



Universidad
Carlos III de Madrid

Ingeniería Industrial

PROYECTO FIN DE CARRERA

MODELADO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO

UTILIZANDO BUSINESS DYNAMICS

Autor: Javier Arce Bonache

Tutor: Francisco Antonio Rivera Riquelme

Leganés, Junio de 2013

Título: MODELADO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO UTILIZANDO BUSINESS DYNAMICS

Autor: Javier Arce Bonache

Tutor: Francisco Antonio Rivera Riquelme

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____ de 2013 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Este proyecto constituye para mí el cierre de un ciclo. Quiero dar las gracias a todos los que han estado presentes en este ciclo, compañeros de clase, compañeros de trabajo en todos estos últimos años, mis amigos y familiares. Todos toman parte en grado alguno en el éxito del presente objetivo alcanzado.

En especial, quería agradecer al profesor Francisco Antonio Rivera Riquelme su confianza y apoyo prestado en el desarrollo de este proyecto sin el cual hubiera sido imposible llevar a cabo el mismo.

A Rui Miguel Domingues Barata, tutor y compañero durante mi beca en la empresa Altran Innovación quien me inició en el mundo de la Dinámica de Sistemas lo que posteriormente sirvió de inspiración para el presente trabajo.

A mis padres, María Teresa y Juan Antonio, porque gracias a sus esfuerzos y sacrificios he logrado llegar hasta aquí, sin ellos no hubiera sido posible. En especial a mi madre por ser fuerte ante la adversidad.

A María Victoria y Vicente por su ayuda y consejos durante todo este tiempo.

A Patricia, por su apoyo incondicional cuando más lo he necesitado, paciencia en época de exámenes y por no perder la fé en mí nunca a pesar de mis decisiones arriesgadas, quizá en ocasiones opuestas al sentido común. Gracias por estar ahí siempre.

Resumen

En el presente proyecto se utiliza la teoría de la Dinámica de Sistemas aplicada al entorno empresarial, o lo que es lo mismo Business Dynamics, para la construcción de un modelo de sistemas dinámicos complejos para la simulación de los procesos de la cadena de suministro de un centro de producción. Esto tiene como objetivo construir escenarios simulados con diferentes resultados más o menos optimistas o pesimistas con el fin de evaluar el comportamiento del sistema y de este modo ser capaces de construir políticas para la toma de decisiones en la gestión de dicha cadena de suministro. La construcción de modelos usando la Dinámica de Sistemas permite elaborar herramientas de gestión estratégica para el medio-largo plazo con el fin de mejorar procesos, mitigar errores de gestión y ahorrar costes, entre otros. En el caso concreto que presentamos, la herramienta que se construye tiene como fin la reducción del 'time to market' de los productos finales que la empresa para la que se construye el modelo fabrica.

Palabras clave: Herramientas estratégicas de gestión, dinámica empresarial, sistemas dinámicos, sistemas complejos, modelado de sistemas, cadena de suministro.

Abstract

In this project we use the theory of system dynamics applied to the business environment, or what is the same Business Dynamics, to build a model of complex dynamical systems to simulate the processes of the supply chain for a production center. This aims to build different scenarios simulated with results more or less optimistic or pessimistic in order to evaluate the performance of the system and thus be able to build policies for decision-making in the management of that supply chain. Model building using system dynamics can develop strategic management tools for medium to long term in order to improve processes, mitigate management errors and save costs, among others. In this case introduced, the tool built aims to reduce the 'time to market' of the end products that the company for which the model is built produces.

Keywords: Strategic management tools, Business Dynamics, System Dynamics, complex systems, systems modeling, supply chain.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Motivación	5
1.3 Objetivos	5
1.4 Cronología	6
2. LAS EMPRESAS.....	9
2.1 Presentación de las empresas.....	9
2.1.1 Altran Innovación	10
2.1.2 Abengoa – Inabensa.....	12
2.2 Situación de partida	13
2.2.1 Principales productos	14
2.2.2 Proceso de venta	17
2.2.3 Sistema de producción	19
2.3 La cadena de suministro en la empresa.....	20
3. LA DINÁMICA DE SISTEMAS Y BUSINESS DYNAMICS	25
3.1 La Dinámica de Sistemas	25
3.1.1 Introducción.....	25
3.1.2 Historia	26
3.1.3 Lenguaje y estructuras sistémicas fundamentales	28
3.1.4 El símil hidrodinámico	33
3.1.5 Modelado mediante Dinámica de Sistemas.....	34
3.1.6 Modelando un sistema.....	38
3.2 Business Dynamics	41

3.2.1	<i>Introducción.....</i>	41
3.2.2	<i>Fundamentos de Business Dynamics.....</i>	41
3.2.3	<i>Principales utilidades.....</i>	43
3.2.4	<i>Modelos mentales</i>	45
3.2.5	<i>Complejidad en la dinámica de sistemas</i>	47
3.2.6	<i>Lenguaje y estructuras sistémicas complejas.....</i>	49
3.2.7	<i>Aplicaciones.....</i>	55
4.	VENSIM	59
4.1	Introducción	59
4.2	Softwares para simulación de sistemas dinámicos complejos	61
4.3	Vensim.....	62
4.3.1	<i>Principales características</i>	63
4.3.2	<i>Crear un modelo con Vensim.....</i>	67
5.	PROCESO DE MODELADO.....	73
5.1	Introducción	73
5.2	Principios de éxito para el uso de Business Dynamics	74
5.3	Pasos del proceso.....	76
6.	MODELO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO	83
6.1	Presentación del modelo del sistema	83
6.1.1	<i>Introducción.....</i>	83
6.1.2	<i>Establecimiento del problema y definición de objetivos</i>	84
6.1.3	<i>Horizonte temporal</i>	86
6.2	Selección de variables	87
6.2.1	<i>Medidores de actuación</i>	87
6.2.2	<i>Elementos del sistema.....</i>	87
6.2.3	<i>Variables características del sistema</i>	91
6.3	Diagrama Causal.....	93
6.3.1	<i>Modelos mentales en la gestión de la cadena de suministro</i>	93
6.3.2	<i>Presentación del diagrama causal</i>	94
6.4	Partes del modelo y diagramas de Forrester	96
6.4.1	<i>Introducción.....</i>	96
6.4.2	<i>Parte asociada al Cliente</i>	96
6.4.3	<i>Parte asociada al Plan de Producción</i>	97
6.4.4	<i>Parte asociada al MRP</i>	98

6.4.5	<i>Parte asociada a Compras</i>	99
6.4.6	<i>Parte asociada al Proveedor</i>	100
6.4.7	<i>Parte asociada a Almacén</i>	104
6.4.8	<i>Parte asociada a Cadena de Producción</i>	107
6.5	Obtención de datos.....	110
6.5.1	<i>Caso Real</i>	110
6.5.2	<i>Caso Hipotético</i>	111
6.6	Validación del modelo.....	112
6.6.1	<i>Importancia de la validación</i>	112
6.6.2	<i>Esquemas de validación utilizados</i>	113
6.7	Presentación de la interfaz de usuario	117
6.7.1	<i>La interfaz</i>	117
6.7.2	<i>Parte general</i>	118
6.7.3	<i>Gestión del Almacén</i>	118
6.7.4	<i>Compras</i>	119
6.7.5	<i>Gestión de la Producción</i>	120
6.7.6	<i>Gestión de Proveedores</i>	121
6.8	Simulando el modelo. Escenarios	122
6.8.1	<i>Introducción</i>	122
6.8.2	<i>Escenario 1</i>	122
6.8.3	<i>Análisis de sensibilidad en el Escenario 1</i>	128
6.8.4	<i>Escenario 2</i>	133
6.8.5	<i>Escenario 3</i>	139
6.8.6	<i>Creación de políticas para la toma de decisiones en la gestión de la Cadena de Suministro</i>	146
7.	CONCLUSIONES	147
	REFERENCIAS	159
	ANEXO I – MODELO COMPLETO	160
	ANEXO II - ECUACIONES	163

Índice de figuras

Figura 1.1 Impacto colateral en la toma de decisiones	2
Figura 1.2 Patrones de crecimiento empresarial	3
Figura 1.3 Simuladores de sistemas	4
Figura 1.4 Cronograma del proyecto	7
Figura 2.1 Altran	10
Figura 2.2 Quimera Project	11
Figura 2.3 Solar Impulse	12
Figura 2.4 Abengoa-Inabensa.....	12
Figura 2.5 Presentacion de instalaciones.....	13
Figura 2.6 Cabinas de media tensión	14
Figura 2.7 Cuadros de fuerza y distribución BT.....	14
Figura 2.8 Centros de control de motores	15
Figura 2.9 Cuadros de medida, control y protecciones.	15
Figura 2.10 Equipos reguladores de tráfico y ticketing.....	15
Figura 2.11 Equipos para centrales nucleares	16
Figura 2.12 Salas eléctricas y equipos modulares.....	16
Figura 2.13 Equipos y electrónica.	17
Figura 2.14 Diagrama de la cadena de suministro en el centro de producción.	20
Figura 2.15 Cadena de producción.....	23
Figura 2.16 Productos intermedios.....	23
Figura 2.17 Almacén de piezas a montar.	24
Figura 3.1 Estructura y comportamiento de un sistema.....	26
Figura 3.2 Diagrama causal con bucle de realimentación	29

Figura 3.3 Comportamiento en realimentación negativa	30
Figura 3.4 Bucle de realimentación positiva	31
Figura 3.5 Comportamiento en realimentación positiva	31
Figura 3.6 Bucle con retraso	32
Figura 3.7 Comportamiento de sistema con retraso	32
Figura 3.8 Símil hidrodinámico	34
Figura 3.9 Variable de estado o Stock	36
Figura 3.10 Variable de flujo	37
Figura 3.11 Variable auxiliar	37
Figura 3.12 Diagrama causal de un sistema real	38
Figura 3.13 Diagrama de Forrester de un sistema real	39
Figura 3.14 Comportamiento ideal de un sistema real	40
Figura 3.15 Estructura de un sistema dinámico complejo	42
Figura 3.16 Esquema lineal en gestión de proyectos	46
Figura 3.17 Diagrama causal para gestión de proyectos	47
Figura 3.18 Diagrama de Forrester para gestión de proyectos	47
Figura 3.19 Arquetipo de crecimiento sigmoideal	50
Figura 3.20 Ejemplo de arquetipo de crecimiento sigmoideal	50
Figura 3.21 Comportamiento con crecimiento sigmoideal	51
Figura 3.22 Arquetipo de impactos no previstos	52
Figura 3.23 Ejemplo de arquetipo de impactos no previstos	52
Figura 3.24 Arquetipo de desplazamiento del problema	53
Figura 3.25 Ejemplo de arquetipo de desplazamiento del problema	54
Figura 3.26 Modelo de sistema dinámico complejo continuo SCM	56
Figura 3.27 Ejemplos de Comportamientos Continuos y Discretos	57
Figura 4.1 Esquema metodológico	60
Figura 4.2 Logotipo Vensim	62
Figura 4.3 Entorno de trabajo en Vensim	64
Figura 4.4 Herramientas de esquema	65
Figura 4.5 Herramientas de simulación	66
Figura 4.6 Herramientas de análisis	66
Figura 4.7 Configuración inicial	68
Figura 4.8 Dibujando el esquema del modelo	69
Figura 4.9 Introducción de ecuaciones	70
Figura 4.10 Simulación del modelo de ejemplo	71
Figura 4.11 Herramienta de análisis Graph	72

Figura 5.1	Proceso iterativo de modelado	81
Figura 6.1	Variable de integración y horizonte temporal	86
Figura 6.2	Estructura del sistema	88
Figura 6.3	Diagrama causal para el modelo de la cadena de suministro.....	94
Figura 6.4	Parte asociada al Plan de Producción	97
Figura 6.5	Parte asociada al MRP	98
Figura 6.6	Parte asociada a Compras	99
Figura 6.7	Parte asociada al Proveedor.....	101
Figura 6.8	Parte asociada a Almacén p1	104
Figura 6.9	Parte asociada a Almacén p2, p3 y p4.....	107
Figura 6.10	Parte asociada a Cadena de Producción	109
Figura 6.11	Parte general en la interfaz de usuario	118
Figura 6.12	Gestión del Almacén en la interfaz de usuario	119
Figura 6.13	Compras en la interfaz de usuario	119
Figura 6.14	Gestión de la Producción en la interfaz de usuario	120
Figura 6.15	Gestión de Proveedores en la interfaz de usuario.....	121
Figura 6.16	Fecha de entrega de pedido terminado Escenario 1	124
Figura 6.17	Herramienta Table	124
Figura 6.18	Resultados Cadena de Producción Escenario 1	125
Figura 6.19	Resultados de Almacén Escenario 1.....	126
Figura 6.20	Resultados de Proveedores Escenario 1	127
Figura 6.21	Fecha de entrega de pedido terminado Escenario 2	135
Figura 6.22	Resultados Cadena de Producción Escenario 2	135
Figura 6.23	Resultados de Almacén Escenario 2.....	136
Figura 6.24	Resultados de Proveedores Escenario 2	138
Figura 6.25	Fecha de entrega de pedido terminado Escenario 3	141
Figura 6.26	Resultados Cadena de Producción Escenario 3	142
Figura 6.27	Resultados de Almacén Escenario 3.....	143
Figura 6.28	Resultados de Proveedores Escenario 3	144
Figura 7.1	Estructura y comportamiento de un sistema.....	148
Figura 7.2	Diagrama de la cadena de suministro en el centro de producción.	149
Figura 7.3	Esquema metodológico.....	150
Figura 7.4	Diagrama causal para el modelo de la cadena de suministro.....	151
Figura 7.5	Diagrama de Forrester de la cadena de suministro.....	152

Índice de tablas

Tabla 3.1 Notación de símbolos	35
Tabla 6.1 Material necesario para fabricar una unidad de producto	91
Tabla 6.2 Variables del elemento Plan de Producción.....	91
Tabla 6.3 Variables del elemento MRP	92
Tabla 6.4 Variables del elemento Compras	92
Tabla 6.5 Variables del elemento Proveedores	92
Tabla 6.6 Variables del elemento Almacén.....	92
Tabla 6.7 Variables del elemento Cadena de Producción.....	93
Tabla 6.8 Valores utilizados para el Escenario 1	123
Tabla 6.9 Valor del medidor de Actuación Escenario 1	124
Tabla 6.10 Variables de actuación directa	129
Tabla 6.11 Variables de actuación directa seleccionadas.....	129
Tabla 6.12 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p1	130
Tabla 6.13 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p1.....	130
Tabla 6.14 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p2	130
Tabla 6.15 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p2.....	130
Tabla 6.16 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p3	131
Tabla 6.17 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p3.....	131
Tabla 6.18 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p4	131
Tabla 6.19 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p4.....	131
Tabla 6.20 Variables de actuación directa con mayor impacto	132

Tabla 6.21 Variables de actuación directa con valores modificados	132
Tabla 6.22 Valor del Time to market	133
Tabla 6.23 Valores utilizados para el Escenario 2	134
Tabla 6.24 Valor del medidor de Actuación Escenario 2	134
Tabla 6.25 Valores utilizados para el Escenario 3	141
Tabla 6.26 Valor del medidor de Actuación Escenario 3	141
Tabla 7.1 Datos del Escenario 1.....	153
Tabla 7.2 Time to market en el Escenario 1	154
Tabla 7.3 Variables de actuación directa	154
Tabla 7.4 Tiempo para almacenar p3.....	154
Tabla 7.5 Capacidad de almacenaje p4	155
Tabla 7.6 Variables de actuación directa modificadas.....	155
Tabla 7.7 Time to market en análisis de sensibilidad.....	155
Tabla 7.8 Datos del Escenario 3.....	156
Tabla 7.9 Time to market en el Escenario 3	157

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Los cambios acelerados en la economía, tecnología, sociedad y entorno suponen un reto para los equipos directivos de las empresas ya que éstos influyen su funcionamiento. Al mismo tiempo, la complejidad de los sistemas en los que nos encontramos integrados, ya sea como personas físicas o como entidades, crece inexorablemente.

Muchos de los problemas que se presentan hoy en la gestión de una empresa surgen de forma colateral como resultados no previstos de algunas decisiones tomadas en el pasado o son impactos no esperados debidos a la naturaleza del sistema. Además, algunas de las soluciones que se aplican a ciertos problemas o decisiones que se adoptan, en ciertos casos, hacen que los problemas que se pretendían corregir se agraven o se generen otros problemas nuevos.

En la [Figura1.1], se muestra un bucle de decisión. Lo que pretendemos conseguir es aumentar el margen de nuestra empresa, para ello se toma la decisión de reducir el personal contratado. Partiendo de esa decisión se obtendrán diferentes impactos, deseados y esperados o indeseados e inesperados. Los impactos no serán instantáneos pues poseen retrasos en el tiempo, como ejemplo, si despedimos a gente pasará tiempo desde que tomamos la decisión hasta que se hacen efectivos los despidos.

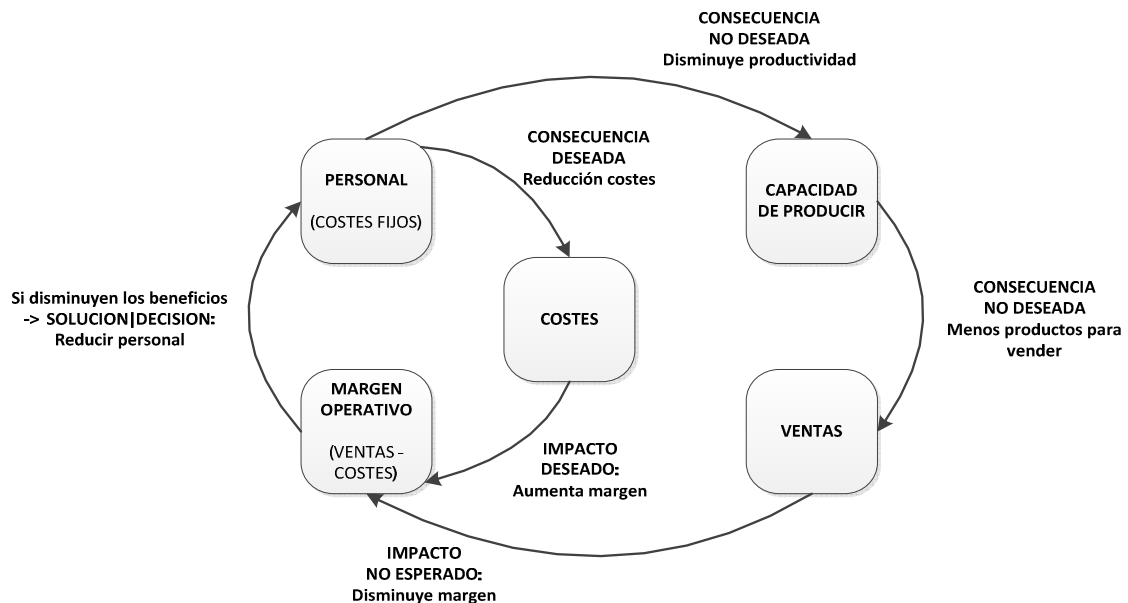


Figura 1.1 Impacto colateral en la toma de decisiones

La toma de decisiones efectivas o con menor impacto negativo y el aprendizaje del funcionamiento de los sistemas en un mundo con una dinámica compleja requiere que nos convirtamos en “Systems Thinkers” [Sterman, 2000; prólogo], o lo que es lo mismo, seamos capaces de alcanzar un “pensamiento sistémico”. Este pensamiento sistémico nos servirá para expandir las limitaciones de nuestros modelos mentales y comprender la estructura de los sistemas complejos y cómo éstos se comportan.

Como podemos ver [Figura1.2], existen ciertos patrones que se pueden dar en la curva de crecimiento de cualquier empresa. Lo más inusual sería encontrarnos con la curva ‘A’ que presenta un crecimiento sostenido en el tiempo. Por el contrario, lo que viene siendo más habitual es encontrar un patrón de crecimiento representado por la curva ‘B’ que presenta un crecimiento debido al éxito de la empresa que posteriormente

se encuentra con algún tipo de crisis, puede ser por ejemplo, un mal dimensionamiento de la estructura organizativa de la empresa que no es capaz de asimilar su expansión [Sterman, 2000; página 99].

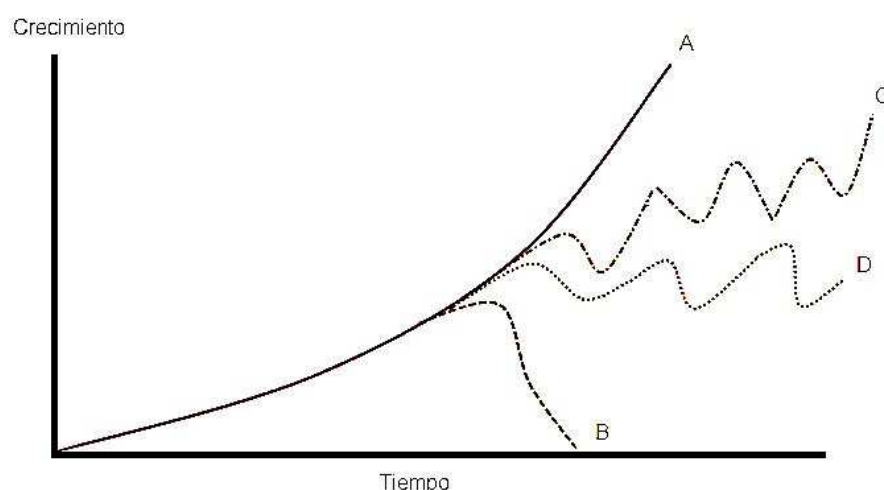


Figura 1.2 Patrones de crecimiento empresarial

También se pueden dar otro tipo de patrones en el crecimiento 'C', 'D', 'N', 'N+1',... a partir de un determinado momento. El comportamiento del sistema, o el crecimiento de la empresa, dependerá de todas las interacciones que se produzcan dentro de ésta y con su entorno (número de empleados, capacidad productiva, ventas, número de clientes, número de competidores, cambios tecnológicos, inflación,...), así como de las decisiones que adoptemos en su gestión, pues como hemos visto antes, ciertos impactos no deseados o inesperados aparecen en un momento determinado como efectos de decisiones tomadas en el pasado.

Si tuviésemos una fábrica de "bolas de cristal" y preguntásemos a cualquier gestor de empresa si estaría interesado en adquirir una de ellas con la que poder predecir el futuro de su empresa y analizar las diferentes consecuencias que tendrán las distintas decisiones que adopte en su gestión, en el hipotético caso de que eso fuera posible, seguro que venderíamos muchas unidades.

Es evidente que la posibilidad de ser capaces de anticipar de una forma intuitiva el comportamiento de una empresa, es decir de un sistema, supondría una ventaja

competitiva respecto a otras empresas del mismo sector. Y eso al final se podría traducir en beneficios para la empresa o en una mitigación de costes.

Partiendo de la base de que hoy por hoy no existe la posibilidad de predecir el futuro, sí existen herramientas para poder intuirlo, o al menos apoyarnos en ellas en la toma de decisiones que afectan a la gestión de la empresa mediante simulaciones de modelos y poder ver qué impactos tendrán estas decisiones en un cierto plazo de tiempo.

También existe la posibilidad de utilizar estas herramientas basadas en la simulación de modelos para entender cómo funciona el/la sistema/empresa que queremos gestionar, del mismo modo que un piloto utiliza simuladores de vuelo para su entrenamiento para obtener agilidad en sus decisiones y saber reaccionar ante situaciones inesperadas simulando diferentes estados [Figura1.3].



Figura 1.3 Simuladores de sistemas

La importancia del “pensamiento sistémico” radica en ser capaces, mediante éste, de recoger y trasladar todos los procesos e interacciones de la empresa y su entorno, que constituyen un sistema complejo en sí mismo, a un modelo de la manera más ajustada, eficiente y precisa posible.

1.2 Motivación

En septiembre de 2012 la consultora Altran Innovación me brindó la oportunidad de desarrollarme en el área de la Dinámica de Sistemas mediante la realización de una beca. El objetivo principal consistía en realizar un proyecto de investigación utilizando la teoría de Dinámica de Sistemas aplicada a un entorno empresarial, lo que se denomina Business Dynamics, para construir un modelo con su correspondiente interfaz para la gestión de los proyectos en ejecución en la unidad de negocio de Aeronáutica, Espacio y Defensa.

Gracias a la experiencia y conocimientos adquiridos en el uso de Business Dynamics surgió la idea de aplicar esta metodología a la gestión de la cadena de suministro de un centro de producción de la empresa Abengoa-Inabensa, en el cual estuve trabajando durante el año 2011. A raíz de ahí se ha construido un modelo para la gestión de la cadena de suministro, lo que constituye el trabajo que aquí se presenta.

Como aclaración, hay que dejar constancia de que en el presente documento no se ha utilizado ningún tipo de dato o modelo construido durante la realización del proyecto en Altran Innovación, respetando de este modo el código de conducta sobre la confidencialidad de la información. En el presente proyecto, objeto de estudio, se ha construido un modelo con fines y estructuras que difieren totalmente. Cualquier parecido que pudiera existir es mera coincidencia y podría ser debido al funcionamiento intrínseco de la herramienta de simulación o a la teoría de Dinámica de Sistemas que es de fuente totalmente libre y abierta a todos.

1.3 Objetivos

El objetivo prioritario que se busca cumplir con la construcción del modelo mencionado que simula la cadena de suministro de dicho centro de producción es el de ser capaces de evaluar el time to market en función de los lead times de los proveedores

y la capacidad de producción del centro objeto de estudio. La simulación entregará la fecha en la que el producto solicitado por el cliente se encuentra ya fabricado y listo para enviar, esto servirá para realizar presupuestos u ofertas más realistas a los clientes y de este modo poder cumplir los plazos establecidos por contrato evitando penalizaciones.

Adicionalmente, y aunque no constituyen objetivos del presente proyecto, mediante el uso del modelo desarrollado, es posible obtener la siguiente información relativa a la cadena de suministro:

- Niveles de stock de productos intermedios y de piezas en cada instante de tiempo.
- Identificar cuellos de botella en la cadena de suministro.
- Obtener el comportamiento del sistema en función de las interacciones que existen entre los diferentes elementos de la cadena de suministro.

Esta información se puede apreciar dentro de los escenarios contruidos y simulados mediante el uso del modelo que se presenta. Cuando se explique el modelo en detalle se hará referencia a algunos resultados obtenidos que tienen que ver con niveles de stock e identificación de cuellos de botella.

1.4 Cronología

En este apartado se muestra el cronograma [Figura1.4] que simboliza los pasos seguidos para la elaboración del presente proyecto.

El proceso de elaboración del proyecto se divide en tres partes principales. Por un lado se encuentra la parte que corresponde al aprendizaje de la teoría de sistemas dinámicos, la metodología de modelado y la recopilación de documentación necesaria

para comprender Business Dynamics. Esta etapa está comprendida entre Octubre de 2012 y Enero de 2013.

La segunda parte constituye el trabajo principal que se pretende presentar en esta memoria. Corresponde con la fase de construcción del modelo para la gestión de la cadena de suministro y su posterior validación. La fase está comprendida entre Diciembre de 2012 y Marzo de 2013.

Por último, la parte de redacción de la memoria y documentación que está comprendida desde finales de Febrero de 2012 a finales de Mayo de 2013.

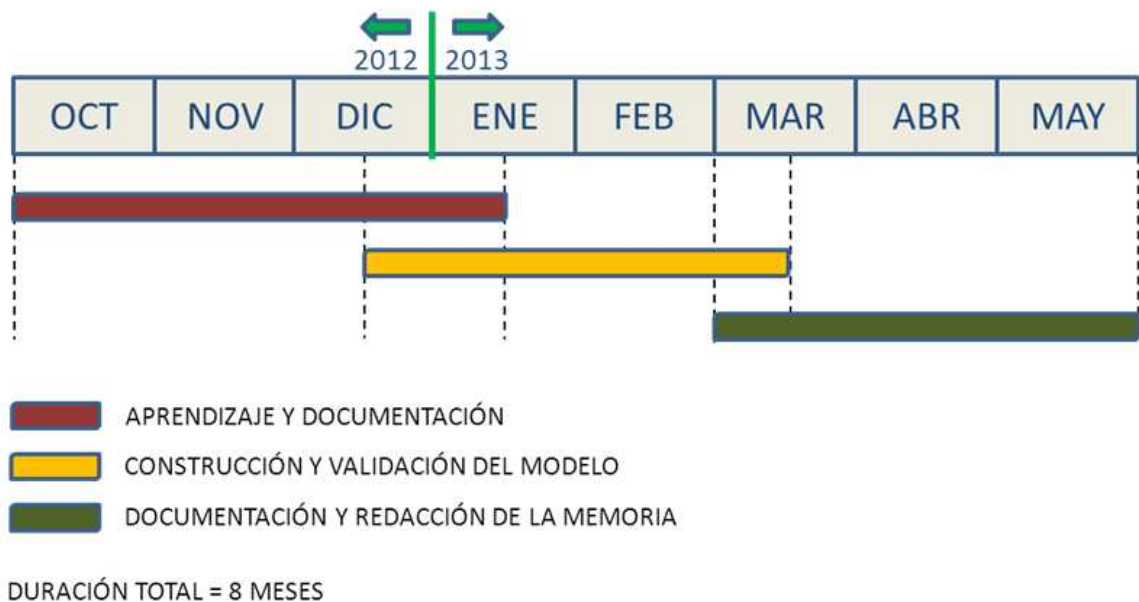


Figura 1.4 Cronograma del proyecto

Existe solapamiento entre las fases, pues el proceso de construcción de un modelo es iterativo y siempre era necesario consultar algún documento para su elaboración. Además para adelantar trabajo se empezó a redactar la memoria cuando el modelo aún no estaba concluido, pues ciertas partes introductorias de la presente memoria no requerían el modelo en su estado completo.

Capítulo 2

Las empresas

2.1 Presentación de las empresas

Por lo general, la realización de cualquier tipo de proyecto de innovación suele estar soportado por algún organismo, público o privado. Ya sea porque aportan financiación, o porque proveen de inspiración a alguien para el desarrollo de productos nuevos, o desarrollos de técnicas de mejora en gestión de procesos, entre otras muchas cosas. Véase como un ejemplo la detección de una oportunidad en una empresa por parte de algún emprendedor para ser desarrollada y vendida como solución a algún problema de ésta.

Para la realización del presente proyecto ha sido necesario, por un lado, la existencia de la empresa que me ha aportado la inspiración del emprendedor aprovechando unos conocimientos adquiridos (Altran Innovación), y por otro, la empresa donde he detectado una oportunidad basada en mi experiencia con el fin de solucionar un problema concreto (Abengoa-Inabensa). En este caso la necesidad se

detectó estando en Altran, cuando ya no trabajaba en Abengoa y por tanto me he basado exclusivamente en los conocimientos que adquirí en esta última para el desarrollo del presente proyecto.

A continuación se presentan las empresas mencionadas de una manera breve y como soporte para la comprensión del trabajo desarrollado en este proyecto.

2.1.1 Altran Innovación

Altran es una empresa de consultoría tecnológica e innovación fundada en Francia en 1982. Posee una facturación de 1.420 millones de Euros en 2011 y 17.261 empleados en todo el mundo y en España de 123 millones de Euros. Cuenta con más de 2000 empleados y tiene como clientes a las 150 empresas más importantes del país, entre las que se encuentran Telefónica, Airbus o Gas Natural.



Figura 2.1 Altran

Sus funciones son dar soporte a compañías en la creación y desarrollo de nuevos productos y servicios en distintos sectores empresariales, tales como, aeronáutico, espacio, defensa, automoción, energía, transportes, seguros, finanzas, salud y telecomunicaciones. Las soluciones que ofrece son investigación y desarrollo, reingeniería y mejora de operaciones, tecnologías de la información y comunicación. Altran considerada como su ADN la innovación y la estrategia.

Algunos de los proyectos de innovación más destacados en los que Altran participa son Quimera Project y Solar Impulse.

- Quimera Project

Se trata del coche eléctrico más potente del mundo y está desarrollado íntegramente en España por un consorcio de empresas, entre ellas Altran, que tienen como objetivo desarrollar e implementar proyectos sostenibles

en áreas urbanas y metropolitanas ofreciendo soluciones sostenibles y de energías renovables.

El coche [Figura2.2] tiene tres motores y 700 caballos de potencia, pasa de 0-100 en 3 segundos y alcanza una velocidad punta de 300 km/h. El chasis monocasco está hecho completamente de fibra de carbono, para hacerlo más ligero y más rígido. La energía que requiere el coche es suministrada por baterías de última generación, de litio-polímero. Posee una autonomía de unos 30 minutos.



Figura 2.2 Quimera Project

- Solar Impulse

El objetivo era la creación de un avión [Figura2.3] que puede volar día y noche sin ningún tipo de energía distinta de la del sol. Altran participó como partner tecnológico en el proceso de creación del avión solar.

Su envergadura es de 64,3 metros, similar a la de un Airbus A340 y posee una superficie alar de 204 metros cuadrados. Mide 21,85 m de longitud y 6,4 m de altura, pesando únicamente 1.600 kilos. Está dotado de cuatro pequeños electromotores de 7,5 kW (10 Caballos) cada uno. Los motores se alimentan por medio de 11.628 células fotovoltaicas que almacenan la energía en baterías de alto rendimiento. La velocidad de crucero del avión es de 70 kilómetros por hora.



Figura 2.3 Solar Impulse

2.1.2 Abengoa – Inabensa

La empresa Inabensa fue fundada en 1994 e integrada en la unidad de negocio de Abeinsa, como parte del holding empresarial de Abengoa. Inabensa está enmarcada en el ámbito de las instalaciones industriales e infraestructuras, así como en otras áreas de competencia tales como despliegue, instalación y explotación de redes de telecomunicación; operación, mantenimiento y mejora en infraestructuras y servicios públicos; mantenimiento de grandes infraestructuras en los sectores de energía, industria y transporte; ejecución de grandes proyectos EPC (Engineering, Procurement and Construction); diseño, suministro, construcción y puesta en marcha de instalaciones de generación de energía eléctrica a partir de las diferentes fuentes de energías marinas y, por último, fabricación de bienes de equipo para la industria auxiliar eléctrica y de electrónica.



Figura 2.4 Abengoa-Inabensa

La unidad de negocio presentó una facturación aproximada de 3.000 millones de Euros en 2011. En concreto la facturación de Inabensa ronda los 800 millones de Euros y posee en plantilla más de 2.500 empleados. Inabensa tiene presencia operativa permanente en 25 países y cuenta con algunas filiales en otros.

Dentro de los proyectos más destacados de Inabensa aparecen los siguientes:

- Proyecto singular estratégico de energías marinas – PSE-Mar.

Diseño de sistemas de captación de energía undimotriz a partir de tecnología española y desarrollo de una infraestructura de experimentación para dichos sistemas. El objetivo de Inabensa dentro del proyecto es el diseño electro-mecánico de conectores submarinos específicos para dispositivos de energía undimotriz.

- Automatización de la instalación robotizada en la fábrica de Psa-Peugeot-Citroën en Vigo.
- Planta de Biomasa en Sangüesa
- Instalación de líneas de Alta Tensión de 132KW en Emiratos Arabes Unidos.

2.2 Situación de partida

El modelo de la cadena de suministro construido se basa en el centro de producción perteneciente a la división de fabricación de la empresa Inabensa [Figura2.5], en concreto en el centro de producción de Madrid, situado en Alcalá de Henares.



Figura 2.5 Presentacion de instalaciones

Las funciones que se desarrollan en el seno de dicho centro de producción son las siguientes:

- Fabricación de equipos de control, instrumentación y electrónica.
- Fabricación de cuadros eléctricos y equipos electromecánicos.

2.2.1 Principales productos

A continuación se detallan algunos de los principales productos que se fabricaban en el centro de producción mencionado.

- Cabinas de media tension.

Diseñadas de forma que con ligeras modificaciones se pueden montar los principales interruptores del mercado tanto en vacío como SF6, así como equipos auxiliares, tales como transformadores de corriente y tensión, relés de protección, etc.



Figura 2.6 Cabinas de media tensión

- Cuadros de fuerza y distribución BT.

Diseñados en estructura modular para poder utilizar los principales interruptores del mercado.



Figura 2.7 Cuadros de fuerza y distribución BT

- Centros de control de motores.

Centros de Control de Motores (CCM) diseñados para poder utilizar cualquier tipo de aparillaje, con comunicación en red, control y monitorización remoto, funciones avanzadas de protección y motorización,

diagnóstico de alarmas, entradas y salidas programables desde relés que permiten mayores ajustes en la protección del motor.



Figura 2.8 Centros de control de motores

- Cuadros de medida, control y protecciones.

Paneles de control, paneles de relés, paneles de alarmas, racks de instrumentos, cuadros de sistemas auxiliares.



Figura 2.9 Cuadros de medida, control y protecciones.

- Equipos reguladores de tráfico y ticketing.

Equipamiento para sistemas de ticketing, control de tráfico urbano e interurbano, control de accesos, señalización ferroviaria.



Figura 2.10 Equipos reguladores de tráfico y ticketing.

- Equipos para centrales nucleares.

Consolas de control, cuadros de fuerza y distribución, C.C.M., cabinas de M.T., sistemas de tomas de muestras, paneles de relés, generador diesel, etc.



Figura 2.11 Equipos para centrales nucleares

- Salas eléctricas y equipos modulares.

Constituidos por una envuelta estanca, generalmente IP-54, que alberga a los diferentes equipos eléctricos que forman el conjunto.

Permite la integración e interconexión de todo tipo de equipos: cuadros de baja tensión, centros de control de motores, cabinas de media tensión, centros de fuerza, equipamiento informático, baterías, transformadores, etc



Figura 2.12 Salas eléctricas y equipos modulares.

- Equipos y electrónica para los sectores de defensa, aeronáutico y espacio.

Productos para los sectores indicados como consolas de mando y control, harness de interconexión, cajas de control e interfaces, Test Bench, EGSE, electrónica embarcada, circuitos, etc.



Figura 2.13 Equipos y electrónica.

2.2.2 Proceso de venta

El proceso de venta dentro de la empresa es fundamental para comprender la problemática que se quiere solucionar en el presente trabajo.

Existen dos maneras en la que se produce una venta en la empresa: Mediante comercial o fuerza de ventas y bajo un pedido de algún cliente con el que ya se haya trabajado antes.

- Mediante el uso de fuerza de ventas o comercial.

La labor de la fuerza de ventas en este caso, y dado el tipo de productos que se fabrican, es la de buscar clientes potenciales que estén o puedan estar interesados en la fabricación de alguno de los productos mencionados, no obstante al ser un formato de fabricación Job-Shop existe flexibilidad en los productos que se fabrican.

- Bajo pedido de cliente en portfolio.

En este caso la venta se produce bajo un pedido de algún cliente que ya conoce o había realizado pedidos anteriores a la empresa.

En cualquiera de los dos casos, se podría considerar la siguiente secuencia una vez el cliente se ha puesto en contacto con la empresa.

1º Presupuesto.

El cliente se pone en contacto con el centro de producción, envía los planos del producto que necesita fabricar y sus especificaciones o restricciones. La oficina técnica se encarga de valorar el coste económico de la producción del producto en cuestión, en función del coste de los componentes en el momento de emitir el presupuesto, además de incorporar ciertos costes de fabricación y el margen que se considere según el caso.

También se determina la fecha de entrega del lote o lotes de productos terminados. Aquí se identifica una necesidad o problema a solucionar que constituye el principal objetivo del presente proyecto. Éste constituye la posibilidad de simular, en función de los leadtimes de los proveedores y las variables de desempeño del sistema de producción en la empresa, el comportamiento que se producirá en su seno. De este modo ser capaces de fijar una fecha de entrega de producto terminado que se ajuste a la realidad. Había casos en los que no se cumplían los plazos de entrega pues existían factores que no se habían contemplado en la presupuestación como son algunos componentes obsoletos o difíciles de encontrar.

2º Pedido

Una vez el cliente recibe el presupuesto para la fabricación, y tras valorarlo o compararlo con otros presupuestos, este procede a su aceptación y emite una orden de pedido por escrito. Es entonces cuando se pone en marcha el proceso de producción.

3º Fabricación

El primer paso tras el pedido del cliente es la creación del plan de producción, encargado de decidir cuándo se empieza a producir en función de la disponibilidad de recursos y la planificación de las

necesidades de materiales, MRP (Material Requirements Planning), encargada de ver los materiales que se necesitan para la fabricación de los productos finales.

Aquí entran en juego compras y almacén para ver qué piezas son necesarias conseguir y en qué número, además de conseguir precios adecuados.

Más tarde producción comienza a trabajar en función del plan de producción que se ha definido e intenta cumplir los plazos marcados.

4º Entrega y Facturación

Una vez terminados los productos se procede a su tratamiento para su envío al cliente, además de emitir la factura correspondiente. Los productos pueden ser almacenados hasta que son enviados al cliente en el momento adecuado o bien se envían directamente.

2.2.3 Sistema de producción

Por el tipo de productos que se fabrican, el sistema de producción implantado en el centro es de tipo Job-Shop. Esto es así debido a la alta variabilidad de productos que se fabrican en el centro de producción requiriendo un alto grado de flexibilidad en los procesos. En resumen se trata de un taller con máquinas y personas no dedicadas.

En este sistema de producción se requieren operaciones poco especializadas que son realizadas por un mismo operario o por un grupo pequeño de ellos. Estos operarios tienen la responsabilidad de terminar todo o casi todo el producto. Como se fabrican productos muy diferentes, los recursos son flexibles y versátiles. El flujo de material es irregular, aleatorio y varía considerablemente de un pedido al siguiente.

2.3 La cadena de suministro en la empresa

A continuación se describe la cadena de suministro y su funcionamiento dentro de la empresa como se puede apreciar en la [Figura 2.14]. Ésta se encuentra dividida en las siete partes mostradas.

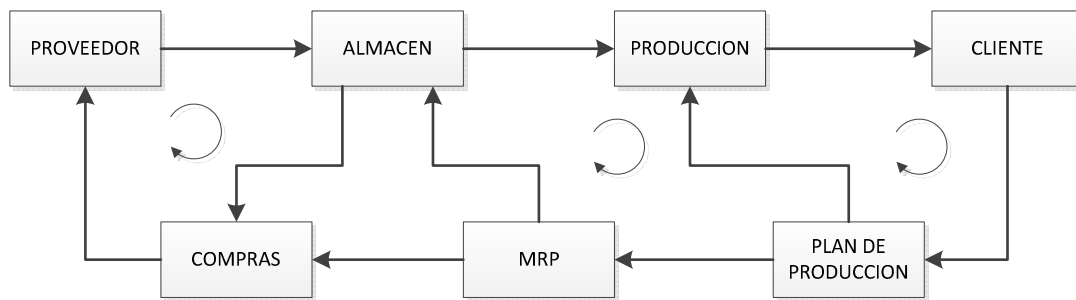


Figura 2.14 Diagrama de la cadena de suministro en el centro de producción.

Además, se pueden apreciar las interacciones que se producen entre las distintas partes de la cadena en forma de bucles de información y material. De este modo se consigue suministrar el producto terminado y bajo pedido después de una serie de pasos. Con el fin de lograr la comprensión del modelo construido, se describen a continuación las funciones que desarrolla cada parte de la cadena de suministro dentro de la empresa.

- Cliente

Es la parte más importante de la cadena por razones obvias. Además el trabajo que se realiza en la empresa, es decir, la fabricación de cualquier lote de productos se hace bajo pedido del cliente y por tanto es este pedido el que pone en marcha toda la cadena de suministro. Un vez que el proceso de producción finaliza se realiza el envío de los productos y se emite la factura.

- Plan de producción

El plan de producción corresponde con el pedido del cliente, es decir, las unidades que se van a fabricar en producción dependen de la cantidad de piezas

que haya pedido el cliente. Como puede no haber piezas para producir los productos demandados, se debe utilizar un MRP.

- MRP (Material Requirements Planning)

El módulo del MRP calcula las unidades de aprovisionamiento a partir de los pedidos de los clientes, teniendo en cuenta la lista de materiales del producto final y las cantidades almacenadas. En este caso el MRP no calcula orden de producción porque el pedido del cliente ya constituye la orden de producción.

- Compras

Es la encargada del proceso de obtener cualquier componente que sea requerido para la fabricación de los productos pedidos por el cliente. Además se encarga de mantener la cartera de proveedores, negociando precios y condiciones o buscando nuevos proveedores con el fin de lograr para los componentes la mejor relación coste, plazo de entrega y cumplimiento de las especificaciones del producto. En muchos casos, la función de compras es reclamar los componentes pendientes de ser enviados o gestionar la búsqueda de componentes que debido a problemas en un proveedor, no van a poder ser recibidos en las condiciones acordadas inicialmente.

- Proveedor

Esta parte está compuesta por varias entidades, cada una de ellas constituye una parte importante de la cadena de suministro pues serán los encargados de suministrar los componentes para la fabricación del producto final. Por ello es requisito indispensable haber homologado a los proveedores y haber firmado contratos con determinadas cláusulas en función de cada proveedor en cada pedido que se realice, pues en caso de defecto o retrasos ellos tendrán que responder. El interlocutor con el proveedor debe ser, dentro de la empresa el departamento de compras. Es importante que cada proveedor asigne un interlocutor propio para que éstos tengan una visión total de todos los pedidos que se les han realizado y su estado para de esta manera se agilicen todos los trámites, como por ejemplo las reclamaciones. Cada vez con más frecuencia se

tiende a que exista un flujo de información recíproco y transparente entre clientes (centros de producción) y proveedores para conseguir beneficios en ambas partes como puede ser previsiones de venta más ajustadas. Aunque en este caso no se contaba con información de los proveedores, como puede ser tiempos de producción, en el modelo construido sí se ha querido tener en cuenta para analizar sus impactos y ver la importancia del conocimiento de esta información.

- Almacén

Su función es la de hacer de nexo entre los proveedores y la cadena de producción. De esta forma se unifican y ajustan los flujos de material que se envían a producción. Además, en el almacén se realizan las tareas de recepción de la mercancía y su comprobación aportando de este modo aseguramiento de la calidad desde el primer ese momento a la cadena. En caso de detectar alguna anomalía se comunica a compras para que ésta reclame al proveedor o busque alternativas, cerrando de esta manera un bucle de la cadena de suministro una vez que la mercancía ha recibido el visto bueno del almacén.

- Producción

Es la parte que representa el valor que la empresa aporta a su cliente final, convirtiendo diferentes productos a otros productos que tienen valor para un cliente y por lo que éste está dispuesto a pagar. Al ser un proceso de producción Job-Shop como se ha comentado anteriormente, no se aprecia una secuencialidad aparente en el proceso de producción [Figura2.15] ya que existe una gran variabilidad de operaciones en el proceso. Los operarios se encargan del proceso de producción de principio a fin realizando diferentes tareas. Además, la producción va a estar condicionada por la cantidad de materiales que se posean en cada momento listos para ser montados, ya que en ocasiones sucede que un componente no ha sido servido en su totalidad y por tanto se salta a la siguiente operación para no perder tiempo a la espera de recibir el resto de la mercancía.



Figura 2.15 Cadena de producción.

En la cadena de producción siempre se aprecian productos intermedios [Figura2.16] a la espera de la realización de operaciones, aunque siempre se intenta en la medida de lo posible trabajar en paralelo para reducir la variabilidad de las operaciones. Lo que significa no pasar a la siguiente operación sin haber terminado la anterior. De esta manera es posible reducir ciertos tiempos improductivos, como pueden ser cambios de herramientas o de posición de los productos.

Como ejemplo, si hay que realizar un taladro y después montar un interruptor en ese agujero, primero se realizaría el taladro en todos los armarios metálicos y después se montan los interruptores en el momento que se disponga de todos ellos, es decir, que no se esté a la espera de ese material.



Figura 2.16 Productos intermedios.

Para que esto sea posible es importante que los materiales necesarios se encuentren disponibles y al alcance de los operarios en la zona de producción. De esta forma resulta más rápido el montaje y la realización de las operaciones necesarias [Figura2.17].



Figura 2.17 Almacén de piezas a montar.

Capítulo 3

La Dinámica de Sistemas y Business Dynamics

3.1 La Dinámica de Sistemas

Para la construcción de modelos y en concreto, de un modelo para la gestión de la cadena de suministro, será necesario seguir una metodología de modelado, empleando herramientas informáticas y apoyándose en una teoría que trata de explicar el funcionamiento y comportamiento de los sistemas sirviéndose de una serie de ecuaciones matemáticas y un lenguaje sistémico, en este proyecto se utiliza la teoría de la Dinámica de Sistemas para la construcción del modelo de la cadena de suministro.

3.1.1 Introducción

La Dinámica de Sistemas permite analizar cómo las relaciones en el seno de un sistema son capaces de explicar su comportamiento. Un sistema es un conjunto de

elementos en interacción. Esta interacción es el resultado de unas partes que influyen sobre otras. Estas influencias mutuas determinarán cambios simultáneamente en otras partes del sistema. Por tanto, los cambios que se producen son reflejos, en alguna medida, de las interacciones que tienen en su seno dichos sistemas. Los cambios en un sistema se manifiestan mediante su comportamiento. Por otra parte, la trama de relaciones constituye lo que se denomina su estructura. Por lo tanto, la Dinámica de Sistemas trata de mostrar cómo están relacionados la estructura y el comportamiento de un sistema [Figura3.1] [Aracil, 1995; página 12].

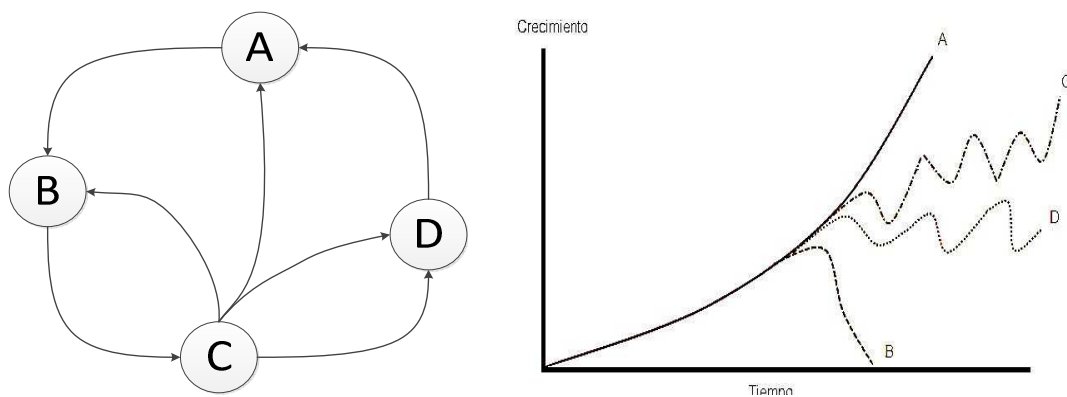


Figura 3.1 Estructura y comportamiento de un sistema

La metodología de Dinámica de Sistemas constituye también un lenguaje que aporta nuevas formas de identificar problemas complejos. A su vez, las herramientas que aporta nos van a permitir ver los sistemas que pueblan nuestro entorno mediante una óptica diferente que nos descubrirá aspectos en los que posiblemente no hayamos reparado. De éste modo podemos obtener una visión alternativa de la realidad, pues la mente del ser humano no es capaz de percibir ciertos aspectos debido a la complejidad de algunos sistemas.

3.1.2 Historia

La Dinámica de Sistemas es una metodología ideada para resolver problemas concretos. Inicialmente se concibió para estudiar los problemas que se presentan en

determinadas empresas en las que los retrasos en la transmisión de información, unido a la existencia de estructuras de realimentación, dan lugar a modos de comportamiento indeseables, normalmente de tipo oscilatorio. Los trabajos pioneros en esta disciplina se desarrollaron a finales de los años 50 basando la nueva metodología en un símil hidrodinámico, que se verá más adelante. Su implantación se produce durante los años 60 en entornos profesionales.

El precursor de esta metodología fue Jay Forrester quien propuso la aplicación de ésta en entornos industriales. Originalmente se denominó Dinámica Industrial. Más tarde esta metodología se denominó Dinámica Urbana debido a la aplicación a sistemas urbanos. En ésta última se consideran como variables los habitantes de un área, número de empresas o viviendas. Con estos modelos se pretende aportar un elemento auxiliar para la planificación urbana y regional, representando las interacciones que se producen entre las principales magnitudes socio-económicas del área correspondiente, generando a partir de éstas, las evoluciones de las magnitudes significativas. Estas son habitantes, indicadores económicos, entre otros. A partir de ellas se pueden planificar necesidades de infraestructuras, por ejemplo.

Uno de los factores determinantes que incrementaron la difusión de la Dinámica de Sistemas ocurrió a finales de los 60 cuando El Club de Roma realizó un informe sobre los límites del crecimiento basado en un modelo de dinámica de sistemas, en el que se analizaba la previsible evolución de una serie de parámetros a nivel mundial como eran la población, los recursos y la contaminación. Con este modelo se podía analizar la interacción de estas magnitudes y se ponía de manifiesto cómo, en un sistema, la actuación sobre unos elementos prescindiendo de otros no conducía a resultados satisfactorios.

Los campos de aplicación de la Dinámica de Sistemas son muy variados. Durante más de 30 años de existencia se ha empleado para construir modelos de simulación informática en casi todas las ciencias. Como ejemplo podemos hablar de modelos de sistemas mediambientales y ecológicos, modelos de dinámica de poblaciones, modelos de sistemas energéticos para definir estrategias de empleo de recursos energéticos.

También modelos aplicados a problemas de defensa, simulando problemas logísticos de evolución de tropas y otros problemas análogos.

La difusión de estas técnicas ha sido muy amplia y en nuestros días se puede decir que constituye una de las herramientas sistémicas mas sólidamente desarrolladas y de mayor implantación [Aracil, 1995; página 14].

3.1.3 Lenguaje y estructuras sistémicas fundamentales

La descripción de un sistema viene dada por la especificación de las distintas partes que lo integran. Mediante el empleo del siguiente ejemplo se puede analizar la estructura sistémica de un proceso, que a su vez constituye un sistema simple. Supongamos el hecho de llenar un vaso de agua. En lenguaje ordinario sería, por un lado los componentes del sistema, una persona, un grifo y un vaso. La persona que llena el vaso de agua mediante la observación del nivel de agua en el vaso actúa sobre el grifo abriendo o cerrando éste. En lenguaje sistémico se podría representar de la siguiente manera [Figura3.2], mediante el empleo de diagramas que muestran la estructura del sistema. Los elementos que componen el sistema se unen entre sí mediante flechas que simulan las influencias que tienen unos sobre otros. Por ejemplo, la discrepancia se determina a partir del nivel deseado y del nivel del vaso y a su vez, la discrepancia determina el flujo de agua que debe dejarse salir del grifo para alcanzar el nivel deseado, entiéndase que en el momento que se alcanza el nivel deseado no es posible seguir incrementado el nivel. En el diagrama se observan flechas que unen la discrepancia con el flujo de agua, éste con el nivel alcanzado, para acabar de nuevo en la discrepancia, forman una cadena cerrada de influencias, es lo que se conoce como 'Bucle de realimentación'.

El conjunto de relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de estructura del sistema y se representa mediante el 'diagrama causal o de influencias' [Figura3.2].

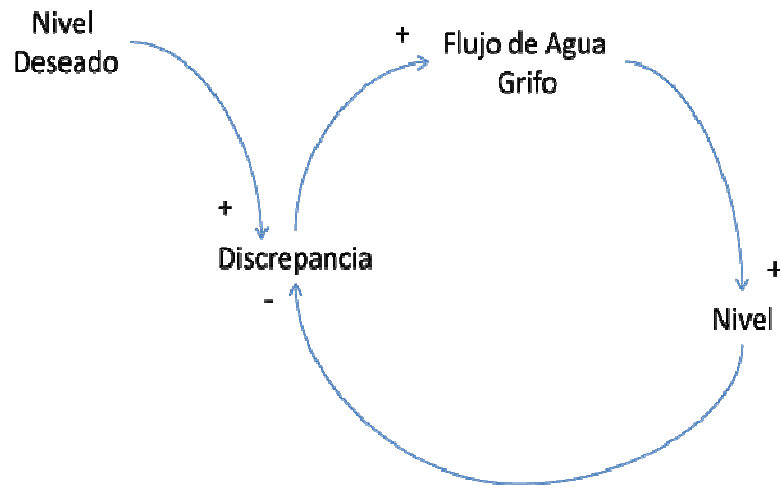


Figura 3.2 Diagrama causal con bucle de realimentación

Opcionalmente a las flechas se les puede asociar un signo que representa las variaciones del elemento anterior y posterior según sentido de la flecha, aportando de este modo una información mas completa sobre la estructura del sistema. En este caso:

Flujo de Agua $^{+} \rightarrow$ Nivel

Quiere decir que entre Flujo de Agua y Nivel existe una ‘influencia positiva’, esto es que si el Flujo de Agua se incrementa también lo hará el Nivel del vaso que estamos llenando.

‘Influencia negativa’ sería el caso siguiente en el cual un aumento del Nivel implicaría una disminución de la Discrepancia.

Nivel $^{-} \rightarrow$ Discrepancia

3.1.3.1 Bucle de realimentación negativa

Este tipo de bucle representa un tipo de situación muy frecuente en el que se trata de decidir acciones a tomar para modificar el comportamiento o el estado del sistema con el fin de obtener un determinado objetivo. Como ejemplo podemos tomar el descrito en el punto anterior [Figura3.2].

En un bucle de realimentación negativa pueden verse perturbados alguno de sus elementos como consecuencia de una acción externa. Se corresponde con ejemplo anterior en el que se trataba de llenar un vaso de agua. El sistema tiende a reaccionar por si sólo en virtud de su estructura para corregir dicha perturbación hasta alcanzar el estado deseado. De este modo se dice que los bucles de realimentación negativa son bucles estabilizadores o balanceadores.

Los bucles de realimentación negativa se suelen representar con una 'B' dentro del bucle que quiere decir 'balance', equilibrio en inglés o un signo menos '-'.

El comportamiento del sistema descrito se representa a continuación [Figura3.3].

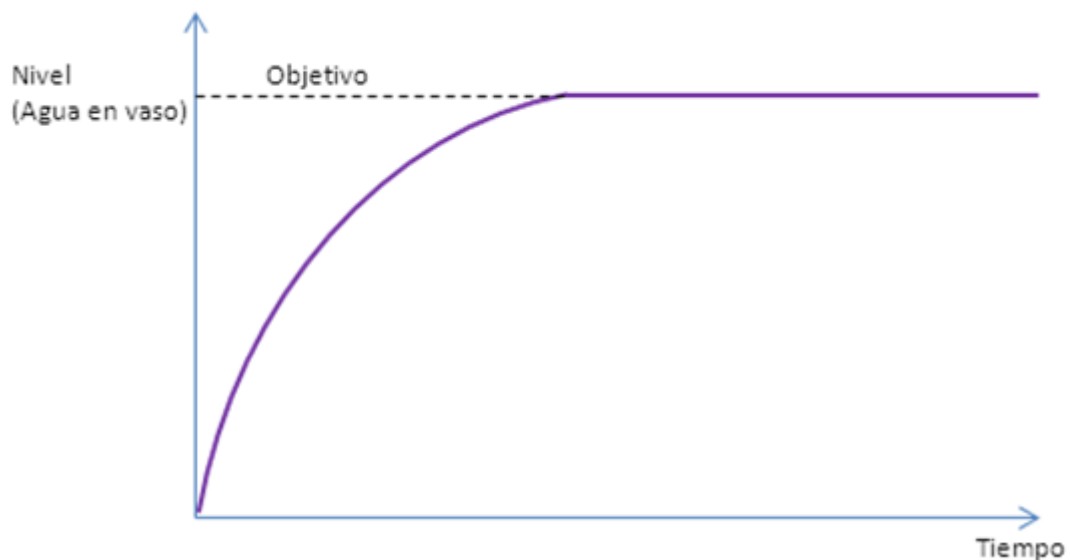


Figura 3.3 Comportamiento en realimentación negativa

3.1.3.2 Bucle de realimentación positiva

Este tipo de bucle representa un proceso en el que un estado determina una acción, que a su vez refuerza este estado y así repetitivamente. Un ejemplo podría ser el crecimiento de población en un país [Figura3.4].

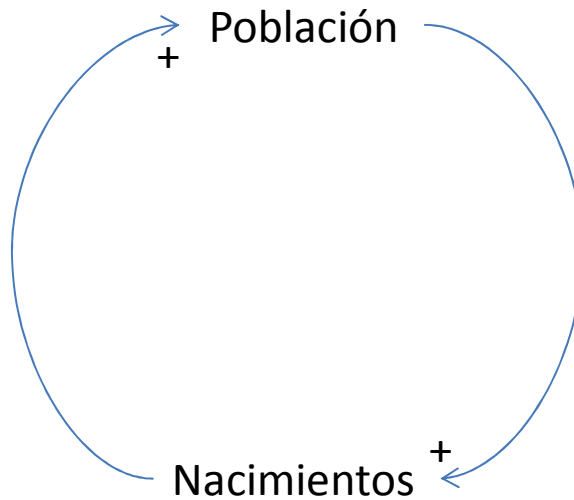


Figura 3.4 Bucle de realimentación positiva

Según esto, cuanto mayor sea la población actual mayor será su crecimiento por lo que a su vez mayor es la población. Esto es que si cualquiera de los elementos del sistema sufre una perturbación, ésta se propaga, reforzándose a lo largo del bucle e inestabilizando el sistema. Por tanto, se obtiene un crecimiento exponencial de la población tal y como se muestra en el comportamiento del sistema [Figura3.5].

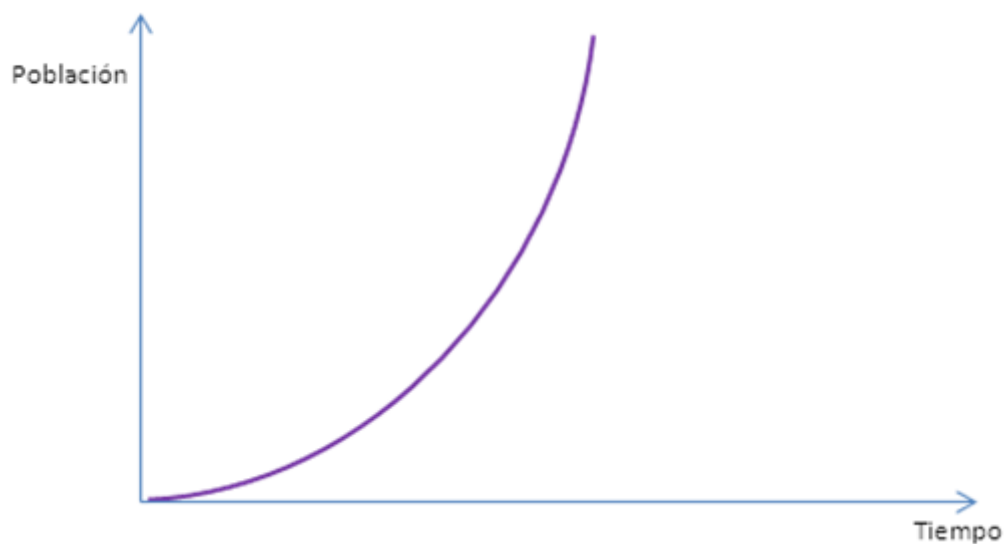


Figura 3.5 Comportamiento en realimentación positiva

Los bucles de realimentación positiva se suelen representar con una 'R' dentro del bucle que quiere decir 'Reinforcement', reforzamiento en inglés o un signo mas '+'.

3.1.3.3 Retrasos

En ocasiones existen influencias entre elementos del sistema que se producen de manera más o menos instantánea y otras que tardan un cierto tiempo en manifestarse. Esto último corresponde con un retraso y se representa de la siguiente manera [Figura3.6].

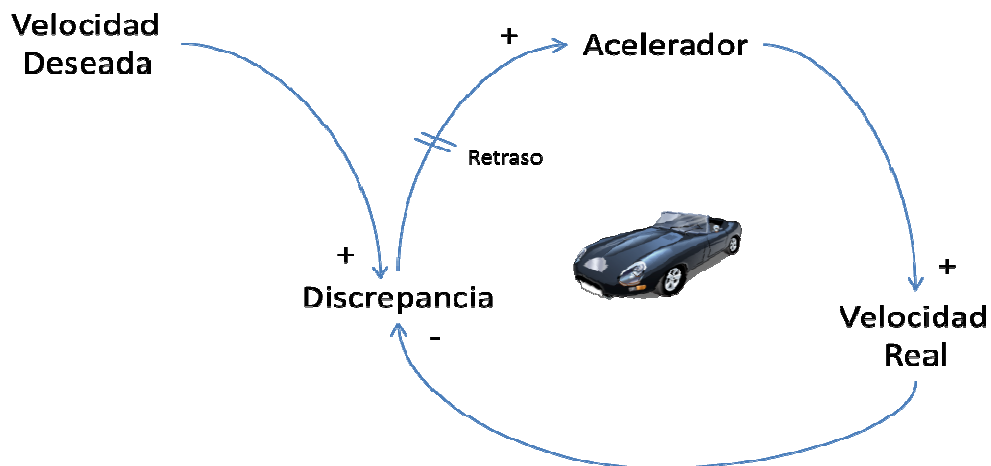


Figura 3.6 Bucle con retraso

Como se aprecia en este ejemplo, si intentamos no sobrepasar el límite de velocidad de 120km/h el sistema tenderá a oscilar en torno a esa velocidad pues es difícil mantener el sistema estable porque pisaremos más o menos el acelerador y si nos pasamos, pisaremos el freno, por tanto, reduciremos mucho la velocidad [Figura3.7].

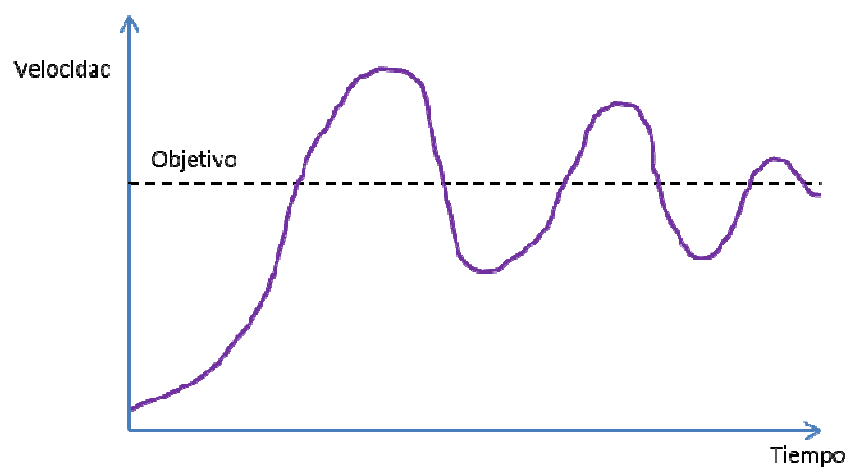


Figura 3.7 Comportamiento de sistema con retraso

Los retrasos tienen una gran influencia en el comportamiento del sistema. En un bucle de realimentación positiva, determinará que el crecimiento no se produzca de forma rápida. En los de realimentación negativa, su efecto puede determinar que ante la lentitud de la obtención de resultados, se tomen decisiones drásticas que conduzcan a una oscilación del sistema en torno al objetivo perseguido.

Los sistemas con los que habitualmente nos encontraremos no se asemejarán exclusivamente a alguna de las estructuras comentadas anteriormente, sino que lo normal será encontrar sistemas complejos en los que coexisten múltiples bucles de realimentación, tanto negativos como positivos, además de retrasos conformando a su vez un diagrama causal complejo. El comportamiento del sistema dependerá de cómo se constituye la estructura de estos sistemas complejos.

3.1.4 El símil hidrodinámico

La generación del comportamiento de los sistemas a partir de los diagramas causales solo es posible con sistemas sencillos como los que hemos visto en el apartado anterior y aun así solamente podría obtenerse de manera totalmente cualitativa. Para obtener valores cuantitativos del comportamiento del sistema, se requiere de una estructura que simule el sistema y posea un contenido matemático más rico que el simple establecimiento de unas relaciones de influencia.

Es por ello por lo que se planteó un símil hidrodinámico para generar una estructura dinámica que pueda ser interpretada cuantitativamente, siendo ésta traducida desde un diagrama causal. [Aracil, 1995; página 55]

Supongamos la siguiente estructura [Figura3.8] [Aracil, 1995; página 58] en la cual se representan tres depósitos de agua X_1 , X_2 , X_3 . Las variaciones en los niveles de los depósitos están determinadas por la actuación sobre cuatro válvulas F_1 , F_2 , F_3 y F_4 que regulan los flujos de alimentación de cada depósito.

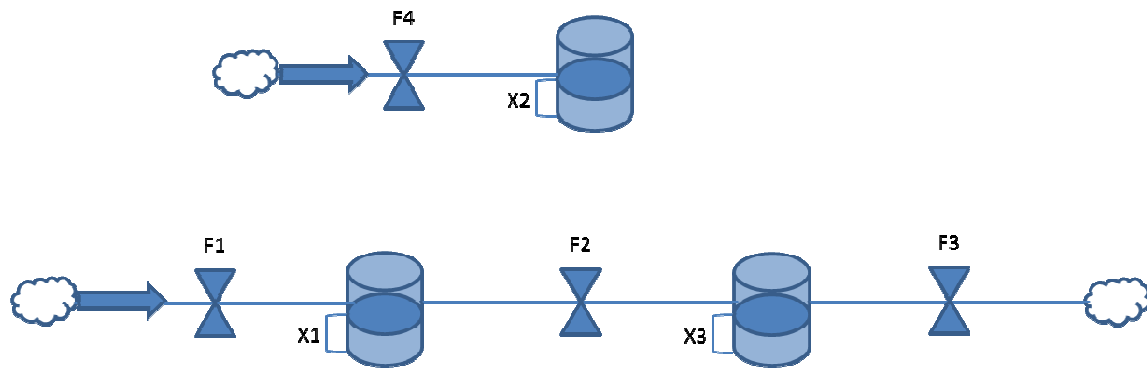


Figura 3.8 Símil hidrodinámico

Con el empleo de un simil hidrodinámico se obtiene una forma intuitiva de representar la estructura de un sistema a través de un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden. La variación en cada uno de los depósitos 'Xi' en cada instante de tiempo es el resultado de los flujos 'Fi' entrantes y salientes, por tanto:

$$\frac{d(X1)}{dt} = F1 - F2$$

$$\frac{d(X2)}{dt} = F4$$

$$\frac{d(X3)}{dt} = F2 - F3$$

La apertura de las válvulas 'Fi' se determina en función de la información que se tenga sobre los niveles alcanzados en cada depósito 'Xi'.

$$F_i = f_i(X1, X2, X3) \quad i = 1, 2, 3, 4$$

Estas funciones 'Fi' puede que sean lineales o no lineales y son las que van a definir el comportamiento del sistema.

Esta estructura llamada inicialmente simil hidrodinámico es lo que actualmente se conoce como Diagrama de Forrester o Diagrama de Stocks y Flujos. En el siguiente apartado se comenta más en detalle cada una de sus partes.

3.1.5 Modelado mediante Dinámica de Sistemas

Para modelar un sistema se utilizan instrumentos tales como diagramas causales y de Forrester así como una serie de ecuaciones matemáticas que formulan el

comportamiento del sistema. Para poder obtener el comportamiento del sistema de una manera rápida, visual y cuantitativa necesitaremos usar un software de simulación. Para construir un modelo del sistema deberemos seguir también una serie de pasos concretos que constituyen un proceso de modelado. De momento, en el presente apartado vamos a explicar cómo construir un diagrama de Forrester y cuáles son sus partes principales.

3.1.5.1 Notación de símbolos empleada

Partiendo del símil hidrodinámico anterior es necesario aclarar que existen diversas notaciones de símbolos y por ello haremos una clasificación de la notación adoptada para el presente proyecto en este apartado [Tabla3.1]. La combinación apropiada de los siguientes símbolos constituirán un diagrama de Forrester del sistema que queremos modelar.







SÍMBOLO	NOMBRE	INTERPRETACIÓN
	Fuente/Sumidero	Fuente inagotable de material o sumidero de capacidad infinita
	Estado/Stock	Hace las veces de depósito. Es una acumulación de flujo
	Flujo	Variación de un/os Estado/Stock del sistema
	Canal	Transmite material (magnitud física) o información
	Tubería	Transmite exclusivamente material (magnitud física)
	Retraso	Simula retrasos en la transferencia de información
variable	Variable estándar o Variable auxiliar	Exógena o endógena del sistema. Ecuación intermedia del modelo
constante	Constante	Empleadas en el modelo
<variable>	Variable fantasma	Es el reflejo de una variable usada en otra parte del modelo

Tabla 3.1 Notación de símbolos

3.1.5.2 Variables principales que intervienen

A continuación, debemos definir las variables principales presentes en un diagrama de Forrester como son las variables de estado, las variables de flujo y las variables auxiliares, así como las interconexiones que se establecen entre ellas.

- **Las variables de Estado**

Representan el conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema. Los estados o Stocks muestran magnitudes que acumulan como resultado de acciones en instantes anteriores [Figura3.9].



Figura 3.9 Variable de estado o Stock

La elección de los elementos del sistema que se representan con variables de estado depende del problema específico que se esté considerando y se les asignarán unidades que sean representativas del sistema modelado. Todas las variables de estado del sistema cambiarán a lo largo del tiempo en respuesta a las variaciones de otras variables.

A cada depósito o estado 'X' se le asocia un flujo de entrada 'Fe' y/o uno de salida 'Fs', de modo que la ecuación que representa su evolución es,

$$X(t) = X(0) + \int_0^t (Fe - Fs) dt \text{ [unidad]}$$

Que resulta igual que la expresión obtenida anteriormente,

$$\frac{d(X)}{dt} = Fe - Fs$$

- **Las variables de Flujo**

Determinan las variaciones en los Stocks o variables de estado del sistema por unidad de tiempo. A las variables de flujo se les asocia ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. El bloque representativo de un flujo admite, como señal

de entrada, la información proveniente de los estados, o de otras variables del sistema y suministra como salida el flujo que alimenta a un estado o Stock. A todo Stock se le asocia al menos una variable de flujo.

Como podemos ver en el diagrama [Figura3.10], al símbolo que representa el flujo se le puede asociar la siguiente ecuación.

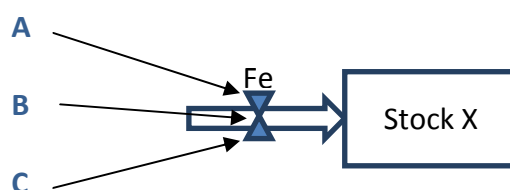


Figura 3.10 Variable de flujo

$$Fe = \frac{A \times B}{C} \left[\frac{\text{unidad}}{\text{tiempo}} \right]$$

Una variable de flujo vendrá siempre medida por la unidad del estado al que alimenta partida por el tiempo.

- **Las variables Auxiliares**

Estas variables representan pasos o etapas en los que se descompone el cálculo correspondiente a una ecuación de una variable de flujo. Esto se muestra a través del siguiente diagrama [Figura3.11] y su ecuación correspondiente.

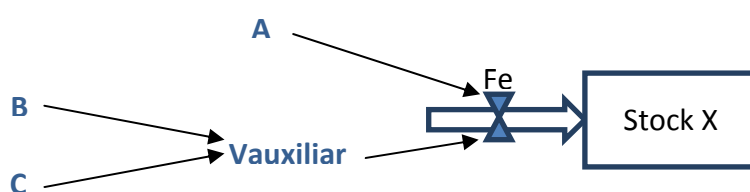


Figura 3.11 Variable auxiliar

$$Vauxiliar = \frac{B}{C} \left[\frac{\text{unidad}}{\text{tiempo}} \right]$$

$$Fe = A \times Vauxiliar \left[\frac{\text{unidad}}{\text{tiempo}} \right]$$

Las variables auxiliares también se pueden utilizar para expresar no linealidades del sistema mediante la introducción de otras ecuaciones intermedias o que son funciones

de otras variables. Como por ejemplo si B y C están ligadas por la expresión $B = f(C)$, donde $f(C)$ es una función no lineal.

3.1.6 Modelando un sistema

En este punto vamos a ver cómo se transforma un diagrama causal en un diagrama de Forrester y se formulan las ecuaciones específicas del sistema, ya que como vimos anteriormente se parte de un diagrama causal de un sistema y éste se traduce a un modelo, que representa el sistema real. Gracias a esto es posible conocer el comportamiento del sistema.

Para ello partimos de un sistema sencillo y con el que estamos familiarizados. Se trata de un sistema de regulación de la calefacción de una vivienda. El sistema real está formado por un usuario que determina la temperatura deseada, un aparato de calefacción que funciona cuando es requerido aportando calor y un termostato que se encarga de regular el funcionamiento de la calefacción con el fin de lograr el objetivo marcado en forma de temperatura deseada.

El diagrama causal, es decir, la estructura del sistema construida usando un lenguaje sistémico se presenta a continuación [Figura3.12].

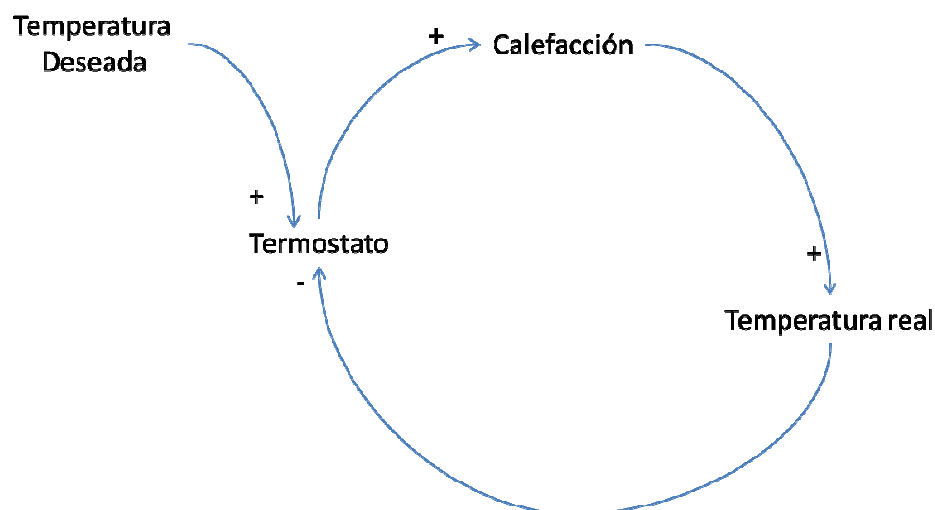


Figura 3.12 Diagrama causal de un sistema real

Para conocer el comportamiento del sistema será necesario traducir este diagrama causal a un diagrama de Forrester, quedando de la siguiente manera [Figura3.13].

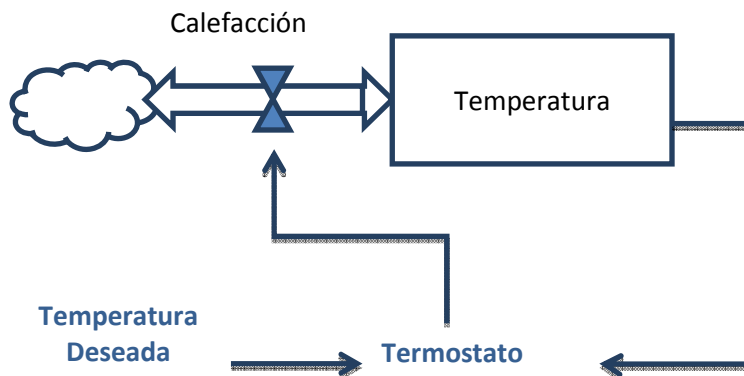


Figura 3.13 Diagrama de Forrester de un sistema real

La variable 'temperatura deseada' hace las veces de una constante que representa el objetivo que queremos alcanzar en nuestro sistema, por ejemplo 26°C.

El 'termostato' se encarga de enviar la orden de funcionamiento a la calefacción para ser encendida o apagada. En el modelo se considera una variable auxiliar cuya ecuación es:

$$\text{Termostato} = \text{Temperatura deseada} - \text{Temperatura (t)}$$

Consideramos la temperatura como la variable de estado pues es el parámetro característico del sistema. La ecuación matemática que representa al Stock 'Temperatura' y su estado cambiante en función del tiempo es:

$$\text{Temperatura (t)} = \text{Temperatura (0)} + \int_0^t (\text{Calefacción On} - \text{Calefacción Off}) dt \text{ [grados]}$$

Si resolviéramos esta ecuación para cada instante de tiempo obtendríamos la respuesta del sistema que estamos modelando [Figura3.14]. Suponemos sistema ideal en el que no hay pérdidas de energía en la habitación y se mantiene la temperatura.

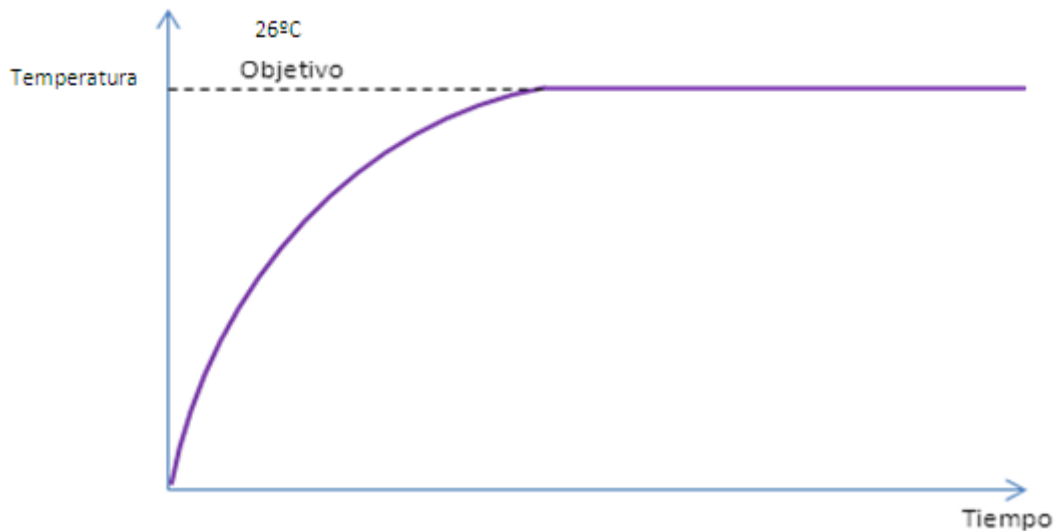


Figura 3.14 Comportamiento ideal de un sistema real

Por último, la variable de flujo sería la 'Calefacción', que representa la cantidad de calor que se genera por cada unidad de tiempo. Existe un flujo de entrada, 'Calefacción On' y un flujo de salida, 'Calefacción Off'. A continuación se muestran las ecuaciones que definen a cada uno de los flujos mencionados.

Para el flujo de entrada, 'Calefacción On'

$$\text{Calefacción On} = \frac{\text{Termostato}}{X \text{ unds. temporales}}$$

Y para el flujo de salida, 'Calefacción Off'

$$\text{Calefacción Off} = \frac{\text{Termostato}}{X \text{ unds. temporales}}$$

En este caso, la ecuación de los flujos es igual sólo que cuando el termostato dé un valor positivo el flujo será de entrada y cuando tome un valor negativo el flujo será de salida, físicamente no es posible pero correspondería con el apagado de la calefacción. El valor de 'X' se mide en unidades de tiempo y puede ser la cantidad que más se ajuste con la realidad del sistema, corresponde con la inercia de éste.

3.2 Business Dynamics

En el presente apartado se pretende explicar qué es Business Dynamics y qué relación tienen con la teoría de Dinámica de Sistemas del punto anterior y por qué el uso de ésta para el desarrollo del presente proyecto.

3.2.1 Introducción

La Dinámica de Sistemas es una herramienta conceptual y un método de modelado de gran alcance. Si la aplicamos al entorno empresarial estaríamos hablando de Business Dynamics. Tiene como objetivo principal la construcción de modelos dinámicos para el análisis de políticas de decisión en la empresa y adicionalmente se presenta como una herramienta de gestión estratégica para el medio-largo plazo. Business Dynamics resulta ser un elemento complementario a otras herramientas de gestión extendidas y que se aplican en la actualidad a cualquier proceso de negocio, incluyendo también una simple hoja de cálculo que constituya un cuadro de mando para ciertos procesos.

Otra forma de explicar Business Dynamics se corresponde con la manera de aplicar la teoría de la Dinámica de Sistemas para resolver problemas concretos en empresas u organizaciones mediante la simulación de escenarios por ordenador de sistemas complejos como lo es una empresa y su entorno. Estas simulaciones devuelven el comportamiento del sistema o la empresa a lo largo de un periodo de tiempo y por tanto nos va a permitir estudiar qué cambios en este comportamiento se producirán basándose en las diferentes decisiones de gestión que se adopten.

3.2.2 Fundamentos de Business Dynamics

Supongamos que tenemos el siguiente sistema dinámico [Figura3.15], se entiende por dinámico el que evoluciona con el paso del tiempo, en el cual se representa una empresa de fabricación de tornillos para la industria del automóvil, y su entorno,

suponiendo éste exclusivamente formado por la tecnología que emplea la empresa de fabricación y el mercado que lo constituyen sus clientes.

Este sistema que aparece representado por su estructura de interacciones se considera un sistema dinámico complejo debido a que su comportamiento puede ser impredecible y porque posee muchos elementos que impactan sobre él y lo alteran, en la vida real se podrían considerar elementos adicionales como puede ser el crecimiento del PIB, el paro, la competencia y otros muchos.

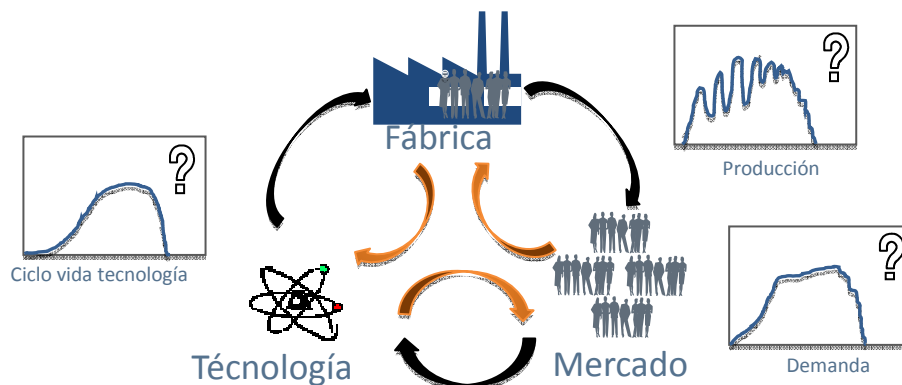


Figura 3.15 Estructura de un sistema dinámico complejo

Los gestores de la fábrica de tornillos observan un descenso en las ventas de tornillos. Después de diferentes estudios, los gestores de la fábrica identifican que es debido al impacto ocasionado por el cambio tecnológico. En la industria automovilística se están introduciendo cada vez más materiales compuestos que van unidos mediante adhesivos en vez de tornillos. Después de analizar diferentes alternativas, se descubre que a diferencia de la venta de tornillos que está en descenso, en el sector del automóvil la venta de asientos no solo se mantiene sino que aumenta. Esto supone un cambio de paradigma en la empresa que decide dar un giro a su modelo de negocio pasando de la fabricación de tornillos al ensamblado de asientos. Esto acarrea ciertas dudas en aspectos claves, como el dimensionamiento del personal una vez definidos los nuevos procesos de negocio, el estado de la empresa después de un periodo de 5 años. Si se habrá logrado un crecimiento, se habrán estabilizado las ventas y al menos no pierde dinero o si por el contrario la empresa quiebra porque ya llega tarde a los cambios requeridos.

Mediante la construcción de un modelo del sistema descrito y teniendo en cuenta todas sus interacciones, la fábrica de tornillos y su equipo directivo se encuentra en disposición de realizar simulaciones y construir diferentes escenarios tanto optimistas como pesimistas. Una vez evaluados y analizados estos posibles escenarios futuros, el equipo directivo se encuentra con algo menos de incertidumbre para acordar una decisión estratégica como sería el pasar a producir asientos.

En la [Figura3.15] se puede observar el comportamiento del sistema desde el punto de vista de cada uno de sus elementos y cómo evolucionan con el tiempo en función de las interacciones simultáneas que se producen. Por ejemplo, partiendo del ciclo de vida previsto de la tecnología empleada, se podrían realizar previsiones de demanda y en función de éstas basar nuestra planificación de la producción. Esto es algo que a simple vista y sin ayuda de herramientas apropiadas el equipo directivo sería incapaz de apreciar o imaginar.

Cabe destacar que esta herramienta se trata solamente de eso, una herramienta, y que por tanto no pretende sustituir a toda la caja de herramientas, es decir sirve de complemento para ser usada con otras herramientas de gestión. También hay que decir que como una herramienta que es, hay que usarla con cordura, al igual que no podemos utilizar un martillo para aflojar una tuerca, hay que ser prudentes y entender que un modelo nunca será igual que el sistema real. Por tanto, no podemos basar nuestras decisiones exclusivamente en lo que el modelo diga. Entrará en juego también nuestra experiencia como gestores y sentido común.

3.2.3 Principales utilidades

Podemos enumerar una serie de utilidades principales que permite Business Dynamics, y por las cuales se presenta como una herramienta muy versátil.

- Simulación de escenarios y captura de efectos a largo plazo

La simulación de escenarios permite evaluar y analizar el comportamiento de un sistema dinámico complejo, observando los efectos que se producen en el mismo en un determinado plazo de tiempo.

- Análisis What-If o ¿Que pasaría si...?

Ajustando o variando ciertos parámetros característicos del sistema que estamos simulando podremos identificar diferentes cambios que se produzcan en su comportamiento.

- Creación de políticas para la toma de decisiones

Mediante el uso de Business Dynamics es posible adoptar políticas para la toma de decisiones basadas en los datos obtenidos de diferentes simulaciones de un mismo modelo.

- Realización de previsiones

Se pueden diseñar modelos de simulación con el objetivo de identificar que impactos no deseados se pueden producir en la evolución de mi empresa, como por ejemplo qué ocurre si disminuyo en una persona el equipo de producción. A corto plazo se disminuyen los costes pero también a largo plazo perderé ventas al producir menos. También se pueden realizar otros tipos de previsiones como por ejemplo de ventas.

- Entrenamiento para gestores e incremento de mentalidad mitigadora

Del mismo modo que un piloto se entrena con simuladores de vuelo con diferentes situaciones, es posible construir modelos para entrenamiento de gestores o directivos, con el fin de que adquieran una mentalidad diferente de gestión a la que están acostumbrados. Es decir, aportarles la capacidad de pensar de forma sistémica, cada acción tiene una consecuencia directa y varias indirectas, en muchos casos inesperadas. De este modo, los managers pueden adoptar decisiones con el objetivo de mitigar otros impactos colaterales.

- Lenguaje para comunicar cambios en el sistema

Con la construcción de un modelo simulable podemos obtener resultados del comportamiento de un sistema. Si se identifican cambios producidos por algún elemento del sistema, como puede ser un cliente, podemos comunicarle a este cliente, que interferencias está introduciendo en el sistema con el objetivo de mitigarlas. Por tanto se considera un lenguaje con el que explicar estos cambios o impactos de forma visual y cuantitativa.

- Reducción de costes

Todas las utilidades anteriores tienen como objetivo común, entre otros, adoptar medidas más eficientes y en resumen conseguir reducir costes.

3.2.4 Modelos mentales

Para poder construir modelos de sistemas dinámicos antes es necesario que desarrollemos nuestro pensamiento sistémico. Es importante comprender cómo funciona el sistema que queremos modelar y esto es una labor tediosa, pues existen muchas interacciones que afectan al sistema y en muchos casos no se consideran casi siempre por desconocimiento.

Nosotros, como seres humanos, tenemos modelos mentales del funcionamiento de los sistemas. Un modelo mental se identifica como la percepción de la realidad que cada uno tiene y por lo general suelen existir diferencias, salvo en los casos en los que ciertos modelos mentales se aprenden de una persona a otra. Esto ocurre con mucha frecuencia en el seno de una empresa, en el cual una persona que lleva haciendo unas tareas toda la vida y le tiene que transmitir a otra persona que entra nueva la metodología de trabajo según el modelo mental que tiene la persona con experiencia. Es por ello que en ocasiones la persona nueva que entra se pregunta basándose en sus modelos mentales el por qué de algunas tareas innecesarias que tenía el trabajador anterior y según los modelos mentales de éste último eran necesarias.

Un ejemplo práctico de un modelo mental dentro de una empresa sería la forma de gestionar un proyecto. El modelo mental sigue un esquema lineal [Figura3.16] en el cual existen una serie de fases que deben ir concluyendo sucesivamente la precedente antes que la posterior. De ahí se calcula la duración total del proyecto para fijar la fecha de finalización y un coste según los recursos asignados.

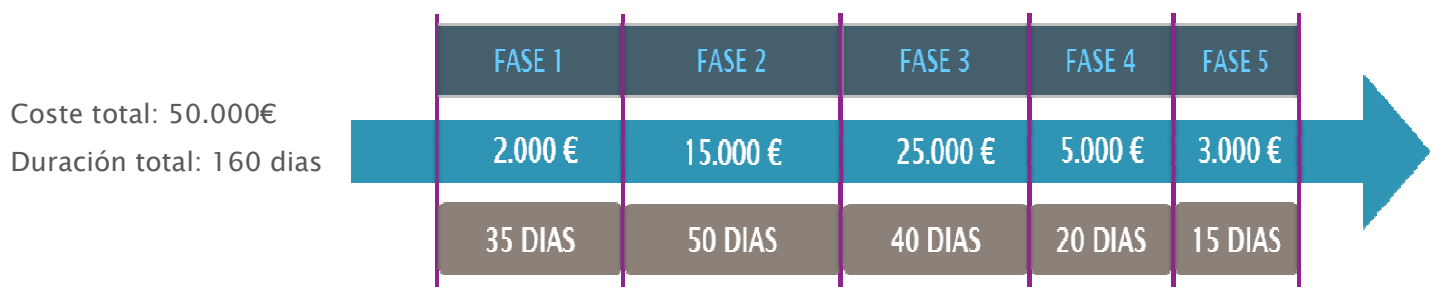


Figura 3.16 Esquema lineal en gestión de proyectos

Hasta aquí todo el mundo está de acuerdo. Pero a veces aparecen retrasos que se pueden producir en algunas tareas, lo que haría aumentar la fecha de finalización del proyecto. Por otra parte, a veces los costes se incrementan porque ha habido errores en la planificación o por el contrario existen fueras de alcance porque no hemos asignado suficientes recursos.

¿Por qué no siempre se cumple el camino que se marca? Y la respuesta resulta reveladora. Porque nuestro modelo mental no se ajusta a la realidad que queremos gestionar ya que un modelo real no es lineal. Además, en el desarrollo de un proyecto intervienen, entre otras muchas, variables humanas que no se consideran en una planificación o presupuesto como por ejemplo, la productividad o calidad de cada recurso asignado.

Un modelo mental, no lineal, para la gestión de un proyecto podría ser el siguiente [Figura3.17]. Se muestra un diagrama causal que representa la estructura de un sistema dinámico complejo para la gestión de proyectos.

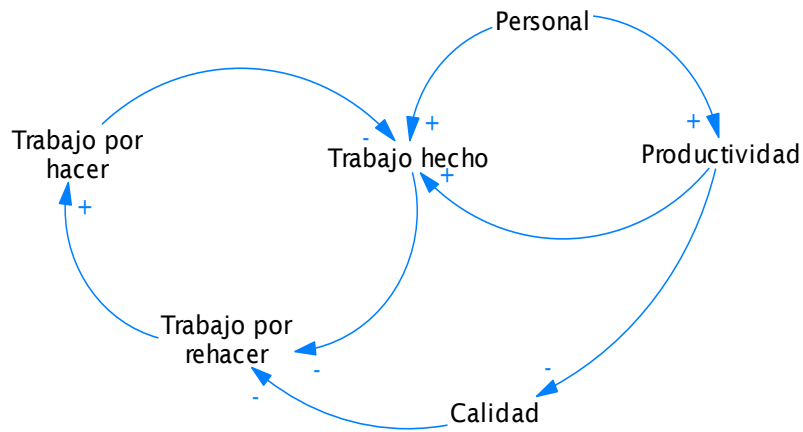


Figura 3.17 Diagrama causal para gestión de proyectos

Partiendo del diagrama causal se puede convertir a un diagrama de Forrester [Figura3.18] que constituye el modelo que vamos a simular con ayuda de un software, no sin antes haber formulado las ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. Esto nos permitirán observar qué decisiones en la gestión del proyecto pueden hacer que alguna tarea se retrase, o cuál será el tiempo de finalización previsto en base a la productividad de los trabajadores y poder hacer previsiones de coste más fiables.

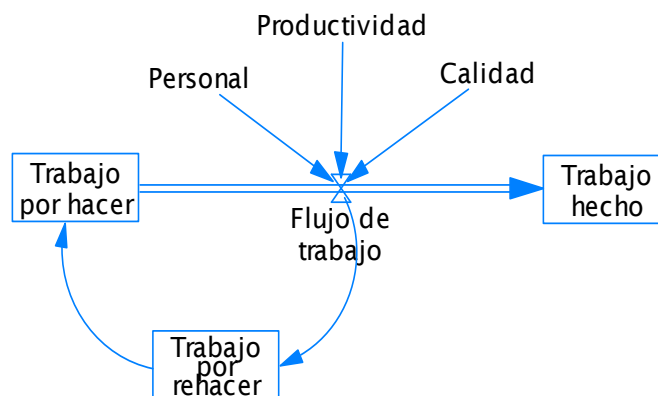


Figura 3.18 Diagrama de Forrester para gestión de proyectos

3.2.5 Complejidad en la dinámica de sistemas

Para muchas personas la complejidad de un sistema significa que éste posee un gran número de interacciones entre los elementos que constituyen el sistema. Pero la

complejidad de un sistema dinámico puede surgir incluso en sistemas simples con pocas interacciones. La complejidad viene determinada por una serie de características implícitas en este tipo de sistemas [Sterman, 2000; página 22]. Estas características se muestran a continuación.

- Dinamismo

Los sistemas evolucionan en diferentes escalas de tiempo. Estos cambios que se producen en algunos elementos del sistema afectan a otros. Un mercado en crecimiento puede entrar en recesión mañana.

- Emparejamiento estrecho

Los elementos involucrados en un sistema están estrechamente ligados y ciertos cambios en uno de ellos pueden ocasionar impactos en otros elementos.

- Gobernados por realimentaciones

Los sistemas poseen bucles de realimentación que afectan al comportamiento del sistema.

- No linealidad

En pocas ocasiones un efecto es proporcional a otro. En la mayoría de los casos el comportamiento del sistema se rige por unas ecuaciones no lineales.

- No intuitivos

En sistemas dinámicos, causa y efecto están distantes en lugar y tiempo. No podemos pensar que un problema surge por una causa concreta pues es posible que esto sea por alguna decisión que hayamos adoptado en el pasado.

- Adaptatividad

El sistema y sus elementos cambian con el tiempo, esto produce cambios en el sistema y por tanto puede hacer que exista una proliferación en alguna parte del sistema y una extinción en alguna otra parte. Por ejemplo, si en un sistema

existen 100 clientes y cada empresa tiene una cuota de mercado, el hecho de conseguir más cuota de mercado hace que mis competidores hayan cedido ésta.

3.2.6 Lenguaje y estructuras sistémicas complejas

Para construir un diagrama causal que represente la estructura de interacciones que se producen en un sistema, y en concreto un sistema dinámico complejo como lo es una empresa y su entorno [Figura3.17], es necesario el empleo de un lenguaje sistémico que se corresponde al mencionado en el apartado 3.2.3 Lenguaje y estructuras sistémicas fundamentales. Con la particularidad de que ahora no queremos construir un diagrama causal de un sistema sencillo representado por estructuras fundamentales exclusivamente, como lo eran los bucles de realimentación positiva o negativa y los bucles con retrasos. Para la aplicación de Business Dynamics es necesario estructuras sistémicas complejas, que son combinación de las estructuras sistémicas fundamentales mencionadas. Las estructuras sistémicas complejas también reciben el nombre de 'Arquetipos sistémicos' [Senge, 1994] y tratan de estandarizar tipos de comportamiento que son comunes en muchos sistemas, ya que aunque cada sistema es diferente éstos poseen ciertos comportamientos replicables. En los siguientes subapartados hablaremos sobre los más relevantes.

3.2.6.1 Crecimiento sigmoidal

Hace referencia a un proceso que se alimenta de si mismo para producir un periodo de crecimiento acelerado. Luego el crecimiento se vuelve mas lento, e incluso puede detenerse o iniciar un colapso. El diagrama que lo representa es el siguiente [Figura3.19].

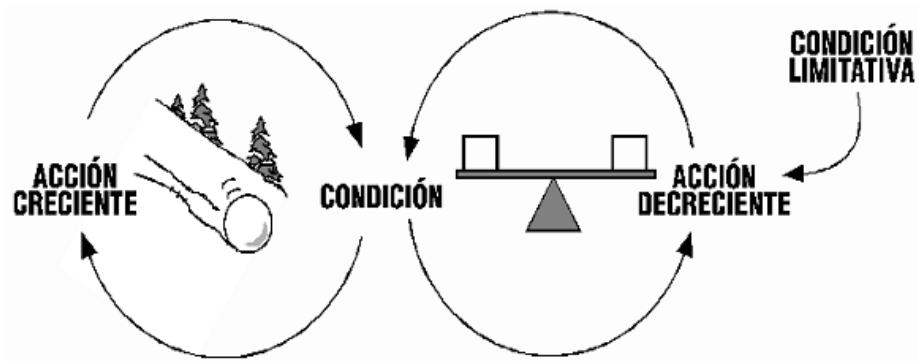


Figura 3.19 Arquetipo de crecimiento sigmoideal

La fase de crecimiento es causada por uno o varios procesos con realimentación positiva. La desaceleración viene causada por un efecto compensador constituido por un bucle de realimentación negativa que se activa cuando se llega a un límite del sistema. Este límite puede ser una restricción del sistema como por ejemplo tener recursos limitados. Este arquetipo también se le conoce con el nombre de 'límites del crecimiento'.

Como ejemplo podemos ver el que se muestra a continuación [Figura 3.20] en el cual una empresa desea incrementar sus ventas a costa de una fuerte inversión en marketing.

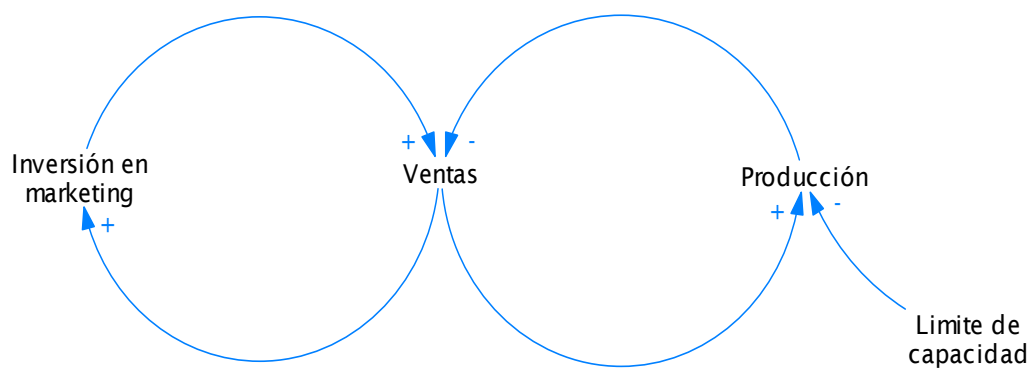


Figura 3.20 Ejemplo de arquetipo de crecimiento sigmoideal

Con el paso del tiempo se observa que a mayor inversión en marketing mayor es el número de ventas, esto representa el bucle reforzador o positivo. Por otra parte para poder cumplir con el aumento de las ventas es necesario incrementar la producción. Esto va bien hasta que se alcanza el límite del sistema que consiste en que la capacidad

productiva de la empresa se encuentra limitada por la cantidad de personal o las máquinas.

El comportamiento resultante del sistema se muestra a continuación [Figura3.21] y adquiere forma de 'S' por eso recibe el nombre de crecimiento sigmoidal. A partir de aquí se puede concluir que el crecimiento infinito es imposible y siempre habrá factores que lo limiten. En caso de querer actuar sobre mi sistema antes de adoptar medidas que potencien el bucle de realimentación positiva, es decir incrementar inversión en marketing, debemos actuar sobre el bucle de realimentación negativa, es decir, eliminar los límites que condicionan el crecimiento.

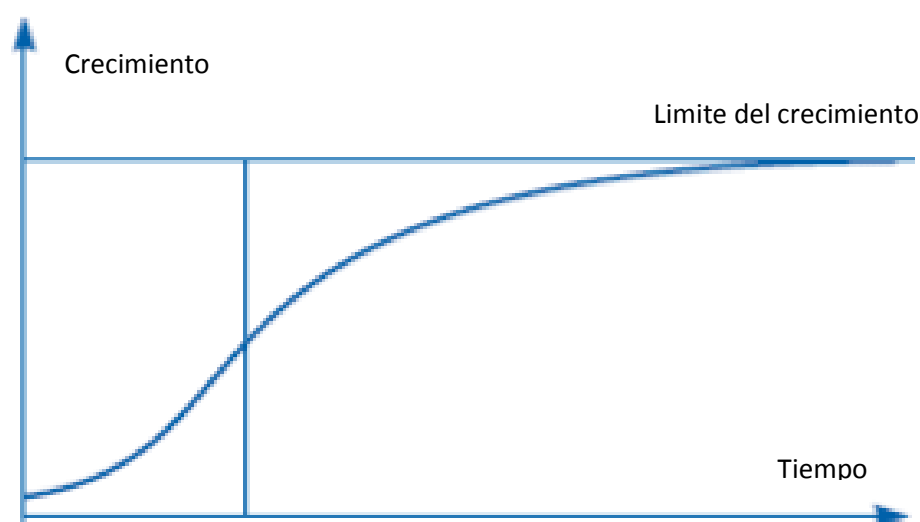


Figura 3.21 Comportamiento con crecimiento sigmoidal

3.2.6.2 Impactos no previstos

Describe procesos dentro de la empresas en los cuales la implantación de una solución eficaz a corto plazo tiene consecuencias imprevistas en el largo plazo que requieren volver a aplicar otra solución y cada vez con mayor impacto negativo. Esto se ve en el siguiente diagrama [Figura3.22].

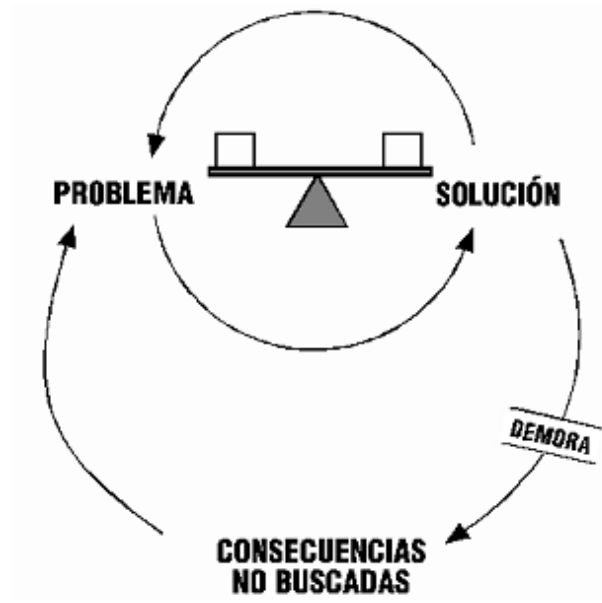


Figura 3.22 Arquetipo de impactos no previstos

Como ejemplo de aplicación del presente arquetipo podemos mencionar el que se refleja a continuación [Figura3.23]. Si se necesita aumentar el margen operativo por problemas de liquidez, se tiende a reducir personal. A corto plazo se ven los efectos pero a largo lo que produce es una reducción de la productividad que impacta negativamente sobre el margen operativo, ya que no tendremos suficientes productos para vender.

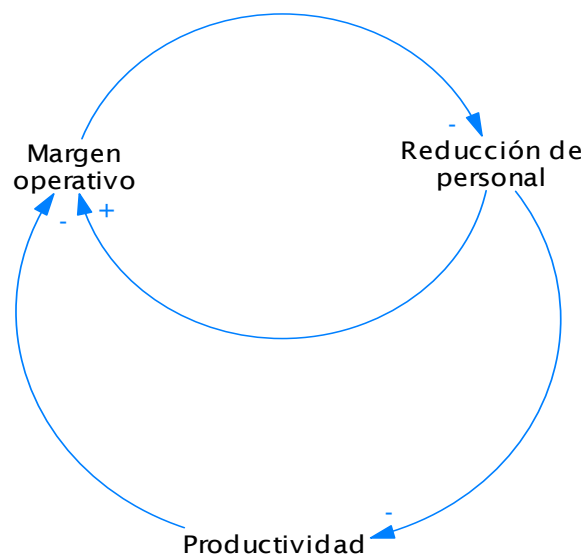


Figura 3.23 Ejemplo de arquetipo de impactos no previstos

Esto nos demuestra que no se debe descuidar el largo plazo y en la medida de lo posible no se debe recurrir a soluciones de corto plazo a menos que sólo sea para ganar tiempo mientras se trabaja en un remedio duradero.

3.2.6.3 Desplazamiento del problema

Representa procesos tales como el uso de una solución de corto plazo para corregir un problema con resultados inmediatos aparentemente positivos. A medida que esta solución se va aplicando recurrentemente con mayor frecuencia, las medidas correctivas fundamentales, las que solucionan el problema de raíz, se van atrofiando produciéndose una dependencia del uso de las primeras. La estructura del arquetipo se muestra a continuación [Figura3.24].

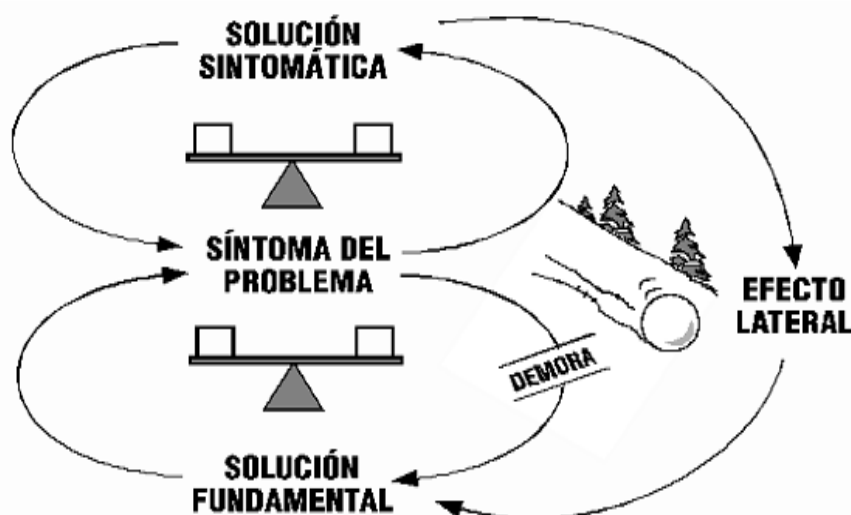


Figura 3.24 Arquetipo de desplazamiento del problema

Como ejemplo tenemos el siguiente diagrama [Figura3.25], en el cual se aprecia la aplicación continua de una solución sintomática que consiste en realizar horas extra por parte de los trabajadores para eliminar la presión del calendario que se tiene en la ejecución de un proyecto. Esto produce un efecto lateral que consiste en el incremento del deseo de abandonar el proyecto o la empresa por parte de los trabajadores. Se observa que la solución fundamental consiste en incrementar el plazo de entrega del proyecto o realizar una mejor planificación. Al final, al gerente del proyecto no le queda más remedio que alargar el plazo del proyecto, porque no son suficientes las horas extra

que se realizan y porque además cada vez le queda menos gente en el equipo. Esto nos dice que lo mejor es adoptar una solución fundamental, mejores planificaciones iniciales, que hubiesen evitado la salida de personal de la empresa.

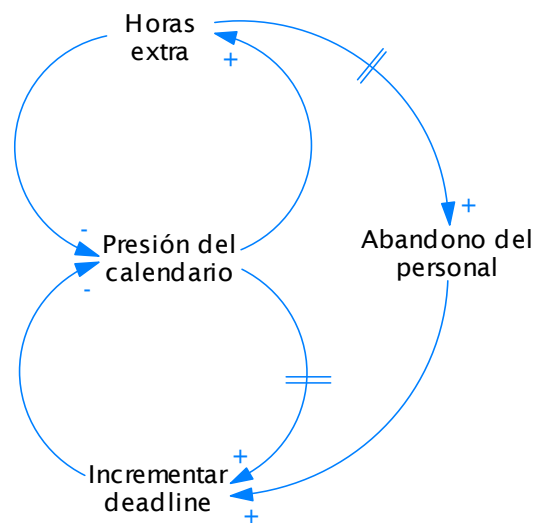


Figura 3.25 Ejemplo de arquetipo de desplazamiento del problema

3.2.6.4 Otras estructuras sistémicas complejas

Aparte de los arquetipos comentados, existen algunos otros tales como, Erosión de metas, Escalada, Éxito para quien tiene éxito, Tragedia del terreno común, Crecimiento y subinversión. Todas ellas se pueden ver explicadas en el libro de Peter Senge, La quinta disciplina. Para el presente proyecto no se considera imprescindible comentarlas aquí, aunque con las anteriores, se ha hecho de modo informativo para ayudar a comprender la metodología empleada.

Hay que añadir que en muchos casos será necesario construir nuevas estructuras sistémicas propias del sistema que queremos modelar. No bastará con combinar estructuras sistémicas complejas o fundamentales como las vistas anteriormente, o como mucho podremos usar de base algún arquetipo definido y añadirle bucles e interacciones adecuadas con el fin de crear una estructura del sistema lo más precisa posible. En el caso del presente proyecto no ha sido necesario el uso de ningún arquetipo preestablecido y por lo tanto se ha tenido que construir uno propio para el sistema que se precisaba modelar.

3.2.7 Aplicaciones

El uso de Business Dynamics ofrece muchas posibilidades. Todo depende del criterio del modelador y del problema que se quiera solucionar, así como de los objetivos que se hayan marcado. Business Dynamics nos aporta una visión diferente sobre diferentes sistemas que deseamos gestionar y una metodología de gran versatilidad para la creación de modelos dinámicos de simulación.

Existen diferentes ejemplos de aplicaciones de Business Dynamics para la simulación de sistemas reales. Podemos mencionar, entre otros, el 'sistema CIA' (Change Impact Assesment) [Cooper, 2009] de la Compañía Fluor, multinacional de origen estadounidense que realiza grandes proyectos de ingeniería y construcción en todo el mundo. Consiste en una herramienta a la cual llamaron 'Sistema de investigación de los impactos producidos por los cambios' que en definitiva se trata de un modelo desarrollado a medida para cada uno de los proyectos que desarrolla la empresa Fluor. Lo utilizaban para gestión de proyectos y además con funciones tales como previsión de costes y de impactos en la planificación ocasionados por cambios en el proyecto. Además, permite realizar simulaciones de gestión para evitar impactos en la gestión del proyecto. Para Fluor la aplicación de Business Dynamics a la gestión de sus proyectos supone un ahorro en costes y la posibilidad de anticipar situaciones y basar sus decisiones de gestión en ello.

Otra aplicación de Business Dynamics consiste en la posibilidad de desarrollar modelos que tiendan a ser estandars con el objetivo de gestionar sistemas que en cierta medida se repitan. Es el caso de la creación de un modelo genérico para la gestión estratégica de empresas Star-up o en crecimiento. Estas poseen procesos de negocio y actividades comunes como pueden ser gestión de clientes de stocks o personal [Huang, 2012]. Este modelo intenta obtener el comportamiento de la Start-up en el tiempo y como va a ir cambiando éste en función de las interacciones que se producen en el seno del sistema.

La diferencia visual principal se aprecia en el comportamiento de los sistemas tal y como se muestra a continuación [Figura 3.27].

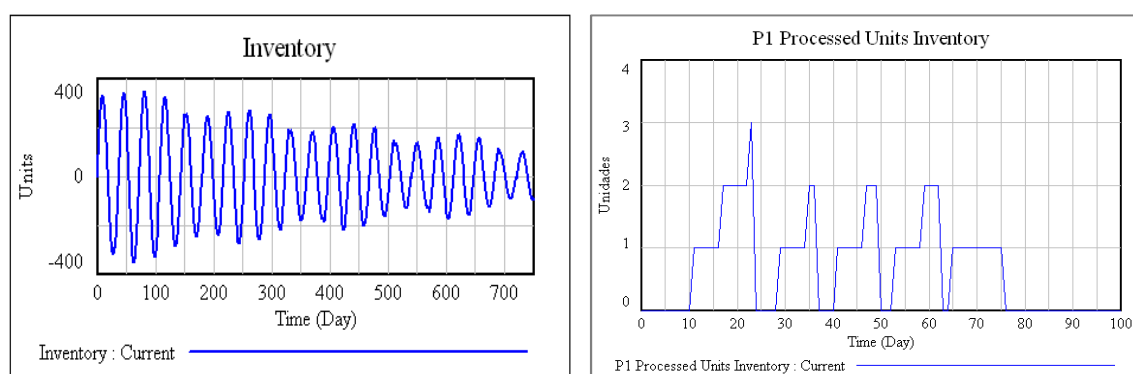


Figura 3.27 Ejemplos de Comportamientos Continuos y Discretos

Por lo general, los modelos de sistemas dinámicos complejos continuos aportan una visión sobre lo que puede ocurrir en el futuro (medio-largo plazo), [Figura 3.27] vista de la izquierda, y se considera una herramienta estratégica siempre que ésta se vea ayudada del sentido común del gestor que la utilice. En cambio, un modelo de sistemas dinámicos complejos de eventos discretos, [Figura 3.27] vista de la derecha, tiene utilidad como herramienta estratégica también pero más orientada a corto-medio plazo, debido a que permite obtener valores enteros de las variables del sistema y por tanto, es posible compararlos con los resultados que se obtienen en el sistema real. Un ejemplo de este último tipo constituye el modelo que se ha desarrollado en el presente proyecto para la gestión de una cadena de suministro en un centro de producción. En el Capítulo 6 se desarrolla en detalle el proceso de construcción del modelo mencionado, los pasos seguidos, el fin perseguido y las partes de las que se compone el modelo, así como, los resultados obtenidos tras su simulación.

Capítulo 4

Vensim

4.1 Introducción

Como hemos comentado anteriormente, resulta necesario el uso de un software que facilite el proceso de simulación y obtención del comportamiento de los sistemas modelados sin tener que resolver independientemente las ecuaciones que describen el comportamiento del mismo para cada instante de tiempo. Más si resultan ser sistemas dinámicos complejos, como es el caso que nos ocupa, ya que existirán un gran número de ecuaciones a resolver. En la actualidad existen diversas herramientas informáticas que permiten apoyar el proceso de modelado y simulación utilizando la teoría de Dinámica de Sistemas. Este tipo de software ha posibilitado el uso y la difusión de la Dinámica de Sistemas para diferentes aplicaciones, pues éstos resultan de gran ayuda al facilitar la obtención de resultados de la simulación en un tiempo reducido aprovechando las posibilidades que ofrecen las computadoras actualmente.

A continuación se muestra el esquema metodológico del proceso de creación de un modelo de simulación basado en Business Dynamics [Figura4.1].

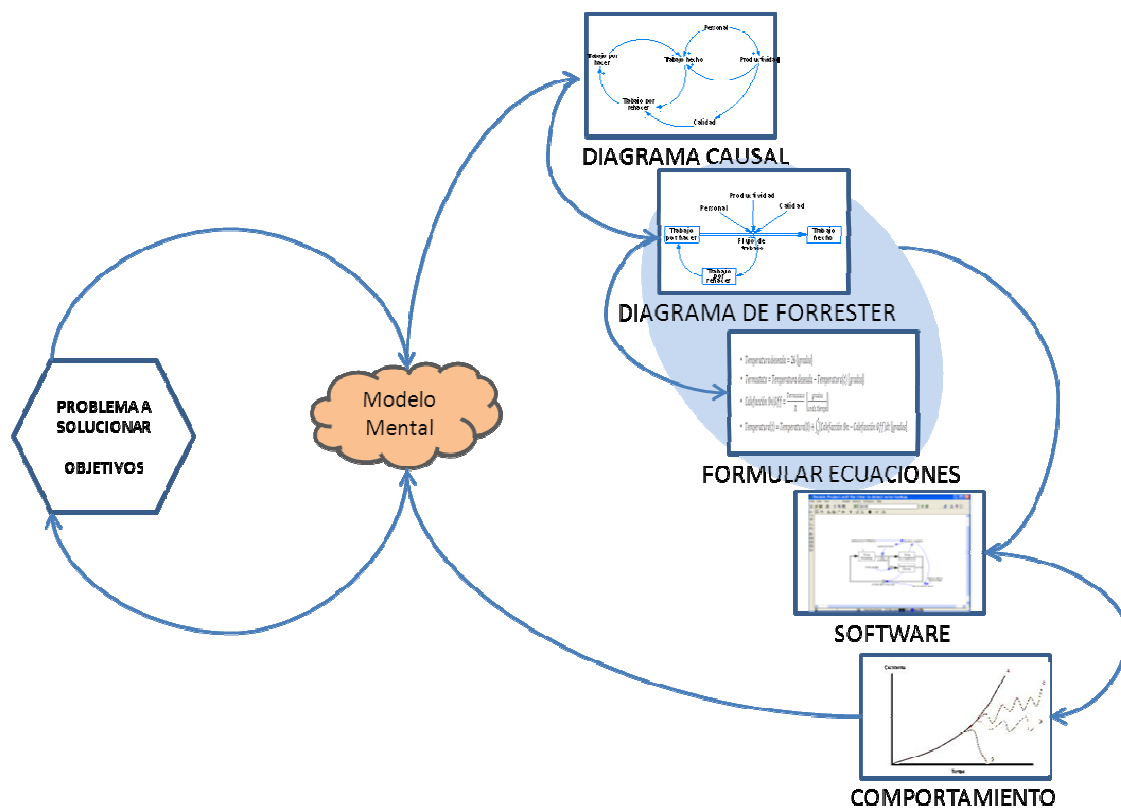


Figura 4.1 Esquema metodológico

Partiendo de un problema que queremos solucionar, podemos planificar unos objetivos que deseamos alcanzar gracias a la información que obtengamos de simular nuestro sistema. Para ello, se parte del modelo mental que se posee con el fin de poder construir el diagrama causal correspondiente al sistema que deseamos gestionar identificando todos los procesos involucrados. Tal y como se explicó en puntos anteriores, este diagrama causal debe ser transformado a un diagrama de Forrester y formular las ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. Una vez llegado a este punto debemos trasladar este diagrama junto con las ecuaciones a un modelo construido con un software de simulación para sistemas dinámicos. Gracias al software y sus funciones podemos obtener el comportamiento del sistema con el fin de tomar decisiones concretas que ayuden a la consecución de los objetivos marcados. Esta metodología resulta iterativa tal y como se muestra por medio de las flechas. Esto quiere decir que nuestro modelo mental después de haber construido el modelo del

sistema puede variar porque entendamos que existen otras interacciones que no habíamos contemplado en su momento y nos hagan volver a modificar diagrama causal del sistema y comenza una nueva iteración. También es posible que al modelar el sistema nos demos cuenta que nos hemos marcado unos objetivos no alcanzables o por el contrario consigamos lo que nos hemos propuesto, además podremos encontrar soluciones a otros problemas que no habíamos considerado en un principio.

4.2 Softwares para simulación de sistemas dinámicos complejos

El avance en los ordenadores y sistemas computacionales ha facilitado enormemente el desarrollo de software de modelado y simulación basados en la Dinámica de Sistemas. En sus inicios estas herramientas facilitaron la labor de simulación permitiendo a los modeladores introducir los sistemas de ecuaciones para poder ser resueltos con algoritmos de métodos numéricos y entregar a continuación los resultados.

Estas herramientas fueron evolucionando con el tiempo para brindar soporte, no solo a la simulación propiamente dicha, sino también para el modelado y el análisis posterior de los resultados, entre otras opciones. Además estas herramientas o licencias de software se fueron adaptando a las necesidades específicas de los usuarios. Es por ello por lo que empezó a surgir software para el modelado y simulación de fenómenos organizacionales, lo que propició su aplicación a entornos empresariales o industriales. Estos últimos son los que nos interesan.

Dentro de las herramientas más utilizadas y que cumplen perfectamente con las necesidades para la realización del presente proyecto podemos mencionar las siguientes.

- AnyLogic
- iThink/Stella
- PowerSim

- Smile
- Vensim

Actualmente estos softwares, algunos más completos que otros, influyendo también en ello el precio de la licencia, ofrecen diferentes servicios a través de un entorno o interfaz de desarrollo intuitivo para el usuario. Entre otras prestaciones, podemos encontrar que poseen herramientas para la creación del modelo como son editores para la creación de diagramas causales y diagramas de Forrester así como la introducción de ecuaciones matemáticas, herramientas para realizar y controlar la simulación del modelo. También algunos de estos softwares presentan mecanismos de análisis para utilizar con los resultados de la simulación obtenidos que son de gran ayuda para entender el comportamiento del sistema, así como para el ajuste y verificación del modelo.

4.3 Vensim

Después de haber realizado una valoración de los anteriores softwares mencionados, se opta por utilizar Vensim, desarrollado por Ventana Systems [Figura4.2]. En concreto, la versión PLE por ser una versión de prueba gratuita para estudiantes y porque es el software que más se utiliza y para el que más recursos se pueden encontrar actualmente tanto en internet como en otras fuentes. También existen otras versiones de pago más avanzadas de Vensim. Además se elige Vensim porque a pesar de ser una licencia limitada presenta mejores prestaciones que otros softwares que compiten con él.



Figura 4.2 Logotipo Vensim

Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. Vensim proporciona una forma simple y flexible de crear modelos de

simulación, sean con diagramas causales o con diagramas de flujos. Las relaciones entre los elementos del sistema representan las relaciones causales, que se muestran mediante la conexión de palabras con flechas. Esta información se usa después por el Editor de Ecuaciones para crear el modelo de simulación. Se puede analizar el modelo en el proceso de construcción teniendo en cuenta las causas y el uso de las variables, y también estudiando los ciclos relacionados con una variable.

Existen diferentes licencias de Vensim aparte de la versión PLE (Personal Learning Edition). Se encuentra la versión PLE Plus que añade otras funciones más avanzadas, como son métodos para analizar resultados del modelo como análisis de sensibilidad y simulaciones paso a paso que denominan juegos, que permiten simular los modelos en cada instante de tiempo y ver como afecta al comportamiento del sistema los cambios que vamos realizando en los parámetros del mismo. La versión Vensim Professional, adecuada para construir modelos más complejos y con aplicaciones profesionales, incluye una librería más completa de ecuaciones implementadas para utilizar con los modelos. Por último, Vensim DSS que se considera la licencia de Vensim más completa y potente pues, además de incluir todas las prestaciones que tienen las otras versiones, incluye una herramienta de desarrollo para interfaces visuales avanzadas para la gestión y operación del modelo, así como para la presentación de los resultados obtenidos tras las simulaciones.

4.3.1 Principales características

El programa Vensim presenta un entorno de trabajo como el que se muestra a continuación [Figura4.3] [Martín, 2007]. La ventana principal de Vensim incluye una Barra de títulos donde aparecen los nombres de las variables que estamos modificando además del título del modelo. Un Menú donde aparecen todas las funciones que presenta la aplicación así como las opciones de configuración. Una Barra de herramientas donde se muestran las principales y más frecuentes acciones que se pueden realizar, así como los tipos de simulación disponibles. Herramientas de esquema, que son las que se utilizan para la construcción de los modelos, tanto diagramas causales como diagramas de Forrester y para introducir las ecuaciones en el

modelo, entre otras cosas. Herramientas de análisis que se emplean después de haber realizado una simulación para obtener los resultados en forma numérica o gráfica. Una zona de dibujo o ventana de construcción donde se dibujan los modelos. Y una Barra de estado que presenta las características seleccionadas para la construcción del modelo como tipo de letra, entre otras cosas, así como una pestaña desplegable que permite la navegación entre las páginas que forman el modelo que no son más que diferentes ventanas de construcción que alojan modelos que se encuentran conectados entre sí mediante el uso de variables sombra.

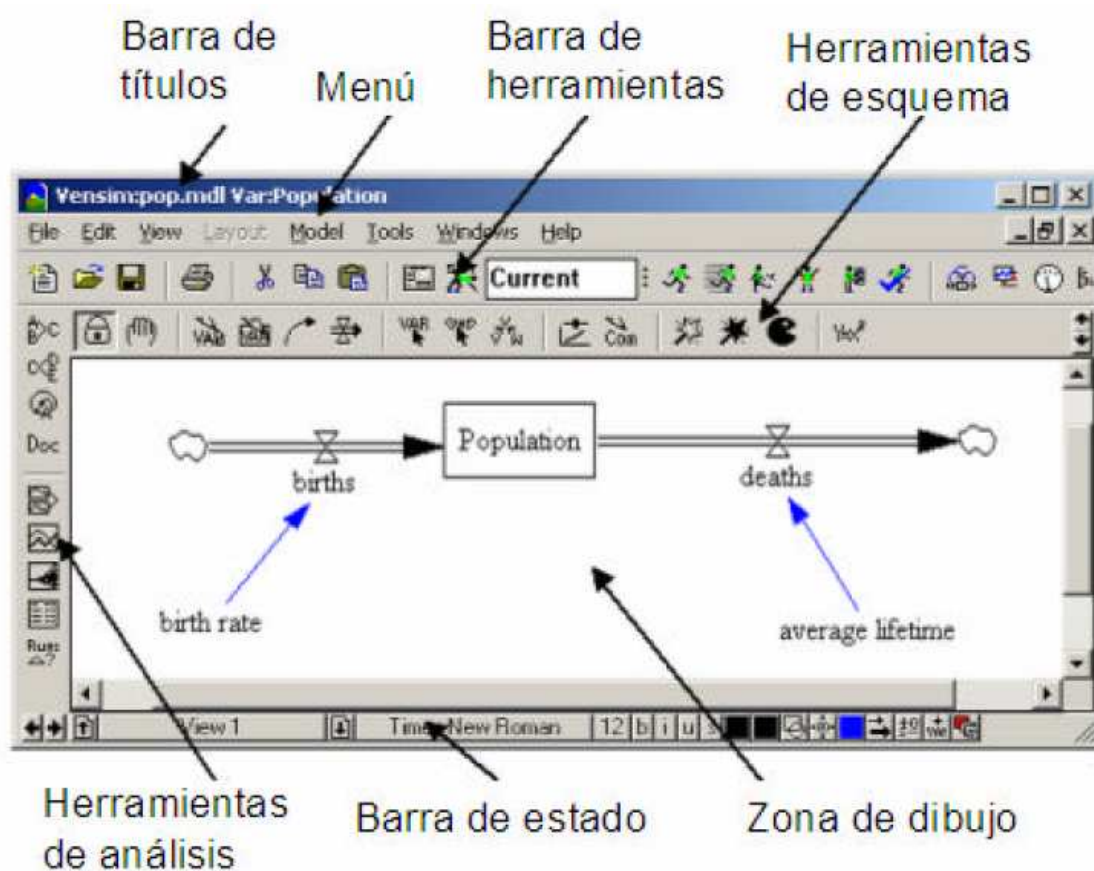


Figura 4.3 Entorno de trabajo en Vensim

De entre todas las partes mostradas en la figura, las más importantes son las que vamos a explicar con un poco más de detalle a continuación.

- Ventana de construcción

Constituye la parte donde se dibujarán los modelos ayudándonos de las herramientas de esquema. Por defecto, esta ventana se abre con el aspecto que tiene la imagen anterior [Figura4.3].

Dentro de la ventana de construcción explicaremos las herramientas de esquema [Figura4.4]. Se indican con aspa roja las que no están presentes en la versión de Vensim utilizada.

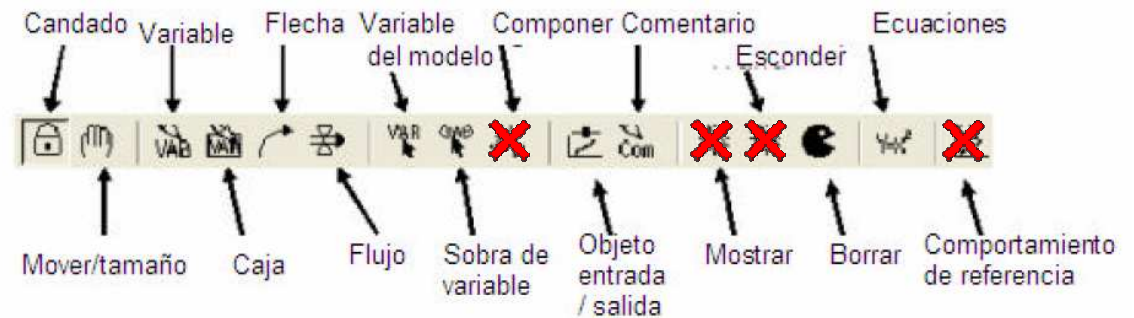


Figura 4.4 Herramientas de esquema

Candado: Bloquea el esquema para evitar cambios involuntarios.

Mover/Tamaño: Mueve o cambia el tamaño de objetos y los selecciona.

Variables: Permite introducir variables o constantes del modelo.

Sombra de Variable: Permite introducir variables sombra de otras en cualquier parte del esquema.

Caja Stock: Crea variables de nivel o Stock con forma de caja.

Flujo: Crea los flujos que conectan los Stocks.

Flecha: Crea las relaciones causales conectando los elementos con éstas.

Variable del modelo: Añade al modelo variables ya definidas anteriormente.

Objeto entrada/salida: Agrega gráficos o tablas.

Comentarios: Agrega comentarios al modelo.

Borrar: Elimina elementos del modelo.

Ecuaciones: Crea y edita ecuaciones formuladas para el modelo en creación.

En el siguiente apartado se construye un modelo de ejemplo sencillo paso a paso para facilitar la comprensión del uso del software y su posterior simulación.

- Barra de herramientas, opciones de simulación

Además de construir modelos, una de las características principales es la posibilidad de realizar simulaciones de los modelos construidos, esto es posible con la barra de herramientas y los diferentes tipos de simulación que permite Vensim [Figura4.5].

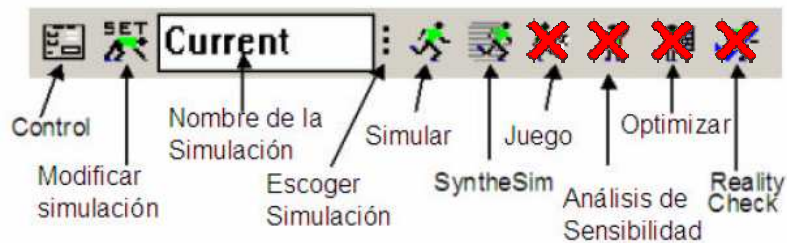


Figura 4.5 Herramientas de simulación

En Vensim PLE solamente se permite el uso de dos tipos de simulación. Simular permite realizar la simulación y obtener los datos en un archivo para luego utilizarlos según convenga. Y SyntheSim que permite simular el modelo viendo en tiempo real cómo se comporta el modelo del sistema y cómo los cambios en ciertas variables afectan a los resultados. El resto de opciones se permiten con la versión profesional.

- Herramientas de análisis

Éstas se usan para mostrar información sobre las variables seleccionadas [Figura4.6], ya sean el valor numérico o en forma de gráfico de comportamiento, entre otras.



Figura 4.6 Herramientas de análisis

Las más importantes y de mayor uso son las que indica la flecha. La primera de ellas muestra el resultado de una variable después de simular el modelo en forma de gráfico ampliado. La segunda muestra una hoja con los valores numéricos que resultan de la simulación para la variable seleccionada. De esta forma seremos capaces de comprender mejor el sistema modelado y compararlo con otros resultados.

4.3.2 Crear un modelo con Vensim

Para construir un modelo en Vensim se siguen los siguientes pasos. Después de obtener el diagrama de Forrester y formular las ecuaciones, se pinta el modelo utilizando las herramientas de esquema explicadas anteriormente. Se simula el modelo cambiando sus parámetros y variables para observar su comportamiento. Se examinan los comportamientos interesantes con más detalle usando las herramientas de análisis comentadas antes. Se realizan experimentos controlados con la simulación y se perfecciona el modelo.

Es necesario seguir un proceso iterativo. Empezar con pocos ciclos de realimentación y poco detalle permite la construcción rápida de un modelo de simulación útil para empezar a trabajar. Este modelo de simulación puede modificarse y mejorarse si es necesario para mostrar un mayor nivel de detalle y complejidad.

Vensim muestra las salidas de la simulación en una sola pantalla, permitiendo observar los resultados de la simulación al instante para todas las variables en la pantalla. El comportamiento dinámico del modelo se va guardando para todas las variables del sistema. Se puede seleccionar cualquier variable de interés y pulsar en la herramienta de análisis apropiada para observar los resultados con más detalle.

4.3.2.1 Antes de comenzar

Antes de comenzar a crear el modelo, debemos configurar el intervalo de integración del tiempo o lo que es lo mismo el intervalo temporal 'Time Step' para el que se obtiene un valor discreto como respuesta. Entre estos valores discretos se interpola utilizando métodos numéricos. Esto lo hace el programa automáticamente para devolver una curva en función del método configurado, ya sea por Runge-Kutta o Euler. Además debemos también seleccionar la duración de la simulación en las unidades de tiempo que apliquen mejor al modelo. Esto se realiza seleccionando en Model/Settings [Figura4.7].

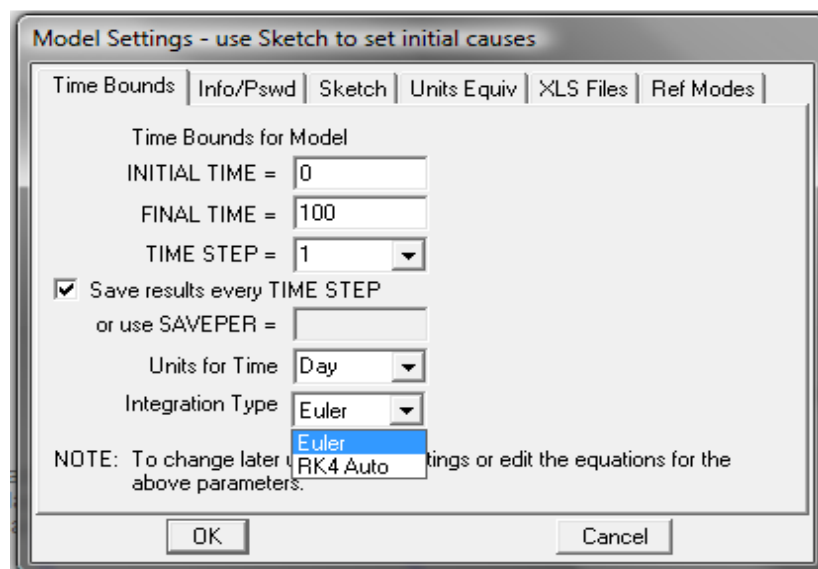


Figura 4.7 Configuración inicial

4.3.2.2 Dibujar el modelo

Para dibujar el modelo se utilizan las herramientas de esquema que se encuentran en la parte superior de la ventana de desarrollo. Para facilitar la comprensión del modelo para la gestión de la cadena de suministro objeto del presente proyecto vamos a realizar un ejemplo. Se va a mostrar la construcción de un modelo en el que se aprecia la evolución de la población de conejos. Mediante el uso de cada uno de los botones de

la barra de esquema debemos construir el siguiente diagrama en el Vensim [Figura4.8] [Martín, 2007].

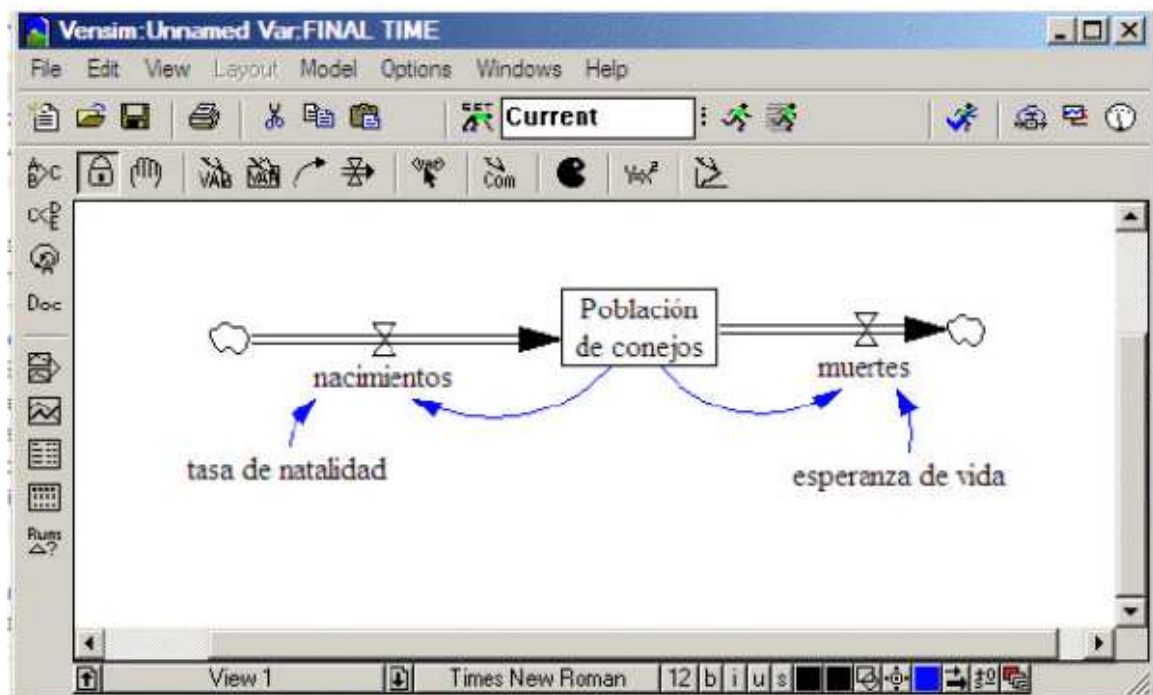


Figura 4.8 Dibujando el esquema del modelo

4.3.2.3 Escribir ecuaciones

Si tratamos de simular el modelo que acabamos de dibujar, Vensim no nos lo va a permitir, pues debemos asociar a cada variable de flujo y Stock la ecuación correspondiente que describe el comportamiento del sistema, además de asignar valores iniciales a las variables. Para ello utilizaremos el botón de agregar o editar ecuaciones, pinchando a su vez en cada elemento que queramos modificar o añadir la ecuación.

Una vez seleccionada la herramienta de ecuaciones pinchamos por ejemplo en la variable de flujo nacimientos. Se nos abre una ventana donde debemos asignar la ecuación correspondiente utilizando las variables que tiene asociadas como son la tasa de natalidad y la población de conejos [Figura4.9] [Martín, 2007].

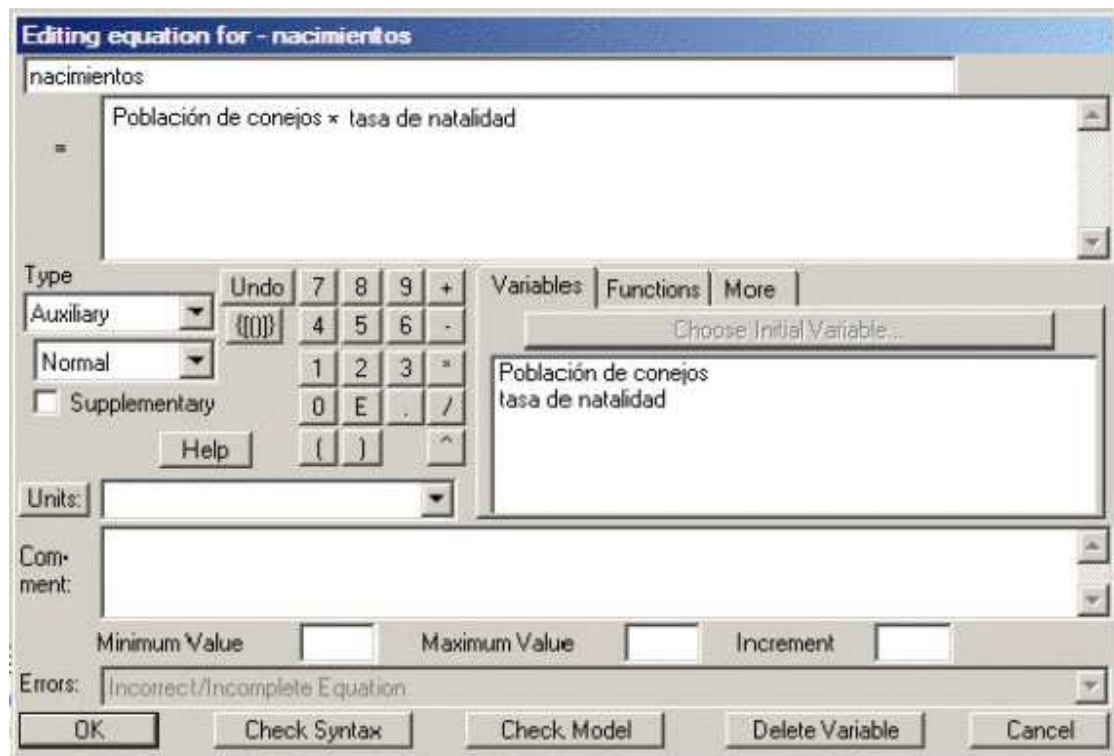


Figura 4.9 Introducción de ecuaciones

Debemos repetir la operación con todos los elementos. Para que el modelo funcione se deben introducir las siguientes ecuaciones:

Esperanza de vida= 8 [año]

Tasa de natalidad=0.125 [1/año]

Muertes=Población de conejos/esperanza de vida [conejo/año]

Nacimientos=Población de conejos X tasa de natalidad [conejo/año]

Población de conejos=INTEG (+nacimientos-muertes) [conejo]; initial value=1000

Esta última ecuación es análoga a la mostrada a continuación.

$$Población\ de\ conejos(t) = Población\ de\ conejos(0) + \int_0^t (nacimientos - muertes) dt \ [conejos]$$

Téngase en cuenta que es importante introducir las unidades correctamente en cada ecuación o parámetro para evitar errores de simulación. Además, así nos aseguramos que el modelo que estamos realizando tiene uniformidad. Para comprobar

que las unidades están correctas pinchamos en Model/Units Check. Si nos da mensaje de OK querrá decir que las unidades están bien introducidas.

4.3.2.4 Simular el modelo

Una vez que tenemos construido el modelo, nos interesa conocer cuál será su comportamiento. Para ello simularemos el modelo construido. Pulsando el icono de Synthesim se obtiene el siguiente resultado [Figura4.10] [Martín, 2007].

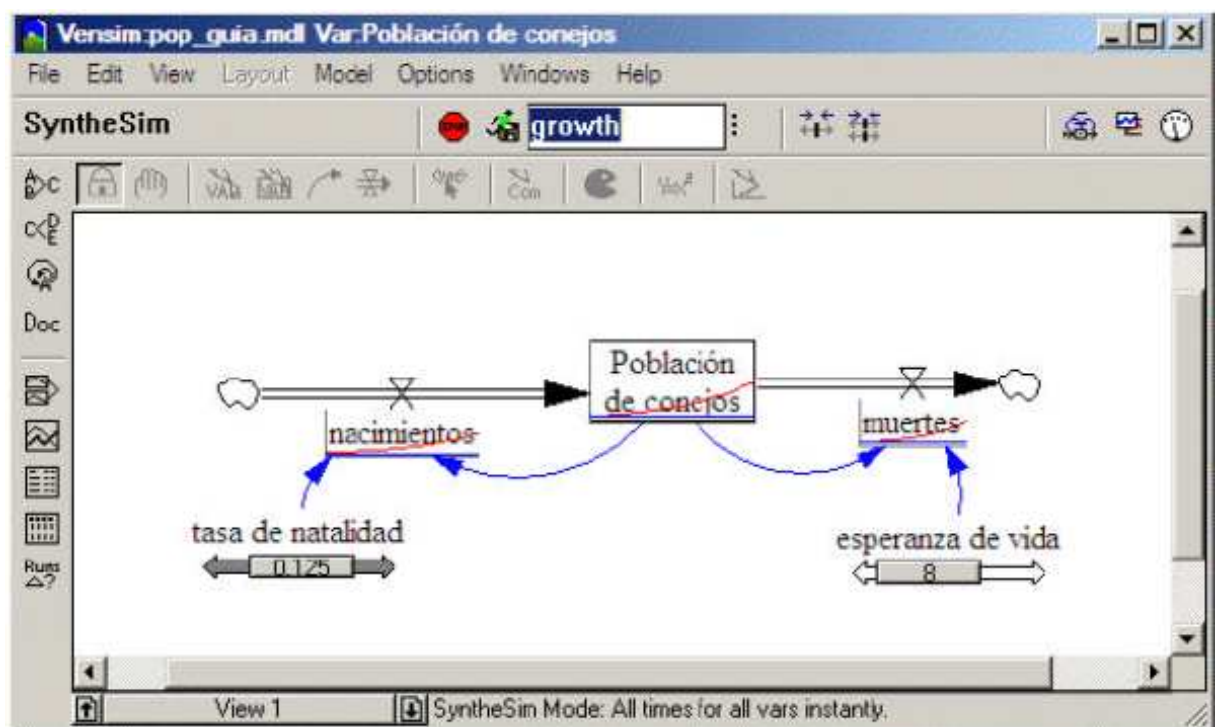


Figura 4.10 Simulación del modelo de ejemplo

Podremos ir variando los parámetros tasa de natalidad y esperanza de vida con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema según los cambios que se produzcan. Para ver con mayor detalle los resultados podemos usar las herramientas de análisis comentadas en el apartado anterior [Figura4.11] [Martín, 2007].



Figura 4.11 Herramienta de análisis Graph

En este caso, se ha mostrado un ejemplo muy sencillo, pero utilizando esta herramienta con modelos de sistemas dinámicos complejos podemos ser capaces de entender cómo se va a comportar por ejemplo una empresa si aumentamos los clientes, reducimos personal, invertimos en aumentar la capacidad de producción, etc.

Capítulo 5

Proceso de Modelado

5.1 Introducción

El proceso de modelado se basa en un conjunto de operaciones mediante las cuales se consigue construir un modelo de la realidad con el fin de alcanzar uno o más objetivos concretos [Aracil, 1995; página 58]. Este proceso consiste en analizar toda la información de la que se dispone con relación al sistema, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje sistémico para después ser capaces de obtener como resultado comportamientos del sistema que nos ayuden a solucionar problemas concretos.

5.2 Principios de éxito para el uso de Business Dynamics

Seguir un proceso de modelado resulta vital para conseguir un modelo que nos sirva. Aunque son muchos y diversos los tipos de modelos que podemos construir y con diversos propósitos, es importante que todos los modelos que construyamos se basen en unos principios para un correcto desarrollo e implementación, al margen del proceso de modelado que debemos seguir [Stermán, 2000; página 79]. Dichos principios se listan a continuación.

- (1) Desarrollar un modelo para resolver un problema concreto, no un modelo del sistema completo.

Un modelo debe tener un claro propósito y este propósito debe solventar el problema que deseamos. Se deben excluir los factores del sistema que no afectan al problema que tenemos.

- (2) Modelar debe estar incluido en un proyecto desde el principio.

El valor del proceso de modelado empieza con la fase de definición de un proyecto.

- (3) Ser escéptico con el valor que aporta el modelado y pensar si realmente se necesita en su caso.

Existen muchos problemas para los cuales la Dinámica de Sistemas no es útil. Hay que considerar si esta es la técnica adecuada para el problema que deseamos resolver.

- (4) Business Dynamics no es una solución única.

Adicionalmente resulta necesario el uso de diversas herramientas estratégicas con el objetivo de adoptar una solución lo mas adecuada posible. El modelado debe ser un complemento a otras herramientas de gestión existentes.

- (5) Centrarse en la implementación desde el principio del proyecto.

Debemos preguntarnos en qué medida resulta útil lo que estamos haciendo y cómo se pueden solucionar los problemas de partida utilizando el modelo.

- (6) El modelado funciona mejor si existe proceso iterativo cooperación entre modeladores y usuarios.

El objetivo de un modelo es alcanzar un conocimiento de cómo el problema a solucionar surge y entonces utilizar ese conocimiento para diseñar políticas para mejorar procesos y solucionar esos problemas.

- (7) Evitar un modelado con carácter de 'caja negra'.

Modelos contruidos desde el punto de vista del cliente, para el que se está construyendo el modelo, nunca servirán para cambiar nada, ya que el modelo mental del cliente es de una manera determinada y este es incapaz a priori de aportar una visión diferente y construir un modelo que aporte valor.

- (8) La validación de los modelos es un proceso continuo.

Los modelos no se validan una vez se han terminado. Durante el proceso de modelado, las opiniones de todas las partes involucradas en el desarrollo y sus modelos mentales pueden hacer que la estructura del modelo varíe y a su vez el comportamiento esperado. Por tanto, es vital la comunicación entre partes y la evaluación de los resultados según va creciendo el modelo.

- (9) Obtener un modelo preliminar que funcione y añadir detalles solo si es preciso.

No se debe intentar construir un modelo preciso desde el principio. Es mejor construir modelos sencillos que funcionen y después ir añadiendo más variables siempre que estas resulten necesarias.

- (10) Un modelo con limitaciones es mejor que un modelo con grandes detalles.

En la vida real todos los sistemas tienen interacciones entre sus elementos. Es por ello muy importante conocer qué es lo que limita la evolución del sistema y su comportamiento e identificar todas esas limitaciones, más que intentar construir un modelo con muchas variables sin saber su grado de inferencia en el sistema.

(11) Utilizar modeladores expertos.

Modelar no es programar en ordenador. Modelar requiere además una disciplina en la metodología, así como conocimientos empresariales, habilidades desarrolladas a través de la experiencia y estudio.

(12) La implementación de un modelo no termina como un proyecto único.

En una empresa, el trabajo de modelado no termina una vez se ha construido un modelo. Los modeladores van mejorando su experiencia y conocimientos y es posible seguir mejorando y ampliando el modelo que se construyó en un inicio como un proyecto individual. La implementación de un modelo usando Business Dynamics es un proceso a largo plazo que involucra a todas las personas de la organización y a los procesos en el seno de ésta.

5.3 Pasos del proceso

A continuación se enumeran los pasos que definen el proceso de modelado [Stermán, 2000; página 86].

1. Definición del problema a solucionar

Tener un propósito definido es el ingrediente más importante para el éxito, ya que un propósito claro permite en mayor medida poder hacernos preguntas que revelen si el modelo es útil para el problema que deseamos solucionar.

a) Selección del tema

Debemos seleccionar qué problema se desea solucionar, es decir, cuáles serán los objetivos del modelo que se construirá y analizar si realmente lo que consideramos un problema resulta serlo. También debemos valorar si el uso de esta metodología como una herramienta será adecuado o por el contrario es necesario el uso de otro tipo de herramientas.

b) Variables clave

En este punto es necesario identificar las variables o parámetros principales que utiliza el sistema que deseamos modelar, además, será necesario seleccionar las que resultan más importantes y que tienen relación con el problema que se desea solucionar.

c) Horizonte temporal

Debemos analizar qué horizonte temporal debe tener el modelo, esto depende claramente del objetivo marcado.

d) Definición del problema dinámico

Aquí debemos tratar de analizar el problema de forma dinámica, es decir, cuál ha sido el comportamiento histórico que se ha producido en las variables y parámetros clave que hemos seleccionado para solucionar el problema. También necesitamos intuir cuál será el posible comportamiento que se va a dar en el futuro, para basar en ello nuestros modelos mentales con el objetivo de construir un modelo que se ajuste lo más posible a la realidad.

2. Formulación de hipótesis dinámicas

Estas hipótesis dinámicas son teorías acerca de cómo los problemas pueden surgir en el sistema que vamos a modelar.

a) Generación de una hipótesis inicial

Cada miembro del equipo tendrá una visión diferente de cómo surgen ciertos problemas. Es por ello que resulta necesario poner de acuerdo las hipótesis dinámicas de todos los integrantes, con el objetivo de empezar la construcción del modelo basándose en un modelo mental construido con la hipótesis dinámica que se ha concretado.

b) Enfoque endógeno

Es necesario formular una hipótesis dinámica que explique el comportamiento dinámico del sistema como consecuencias endógenas de sus bucles de realimentación.

c) Mapeado

La dinámica de sistemas presenta una variedad de herramientas suficientes como para poder comunicar nuestro modelo mental de un sistema y representar una estructura causal del mismo. Los principales, tal y como hemos comentado con anterioridad, se corresponden al diagrama causal y al diagrama de Forrester aunque existen otros adicionales.

- Tabla de limitaciones del modelo

En esta se resume el alcance del modelo listando qué variables clave están incluidas endógenamente en el modelo, cuáles son exógenas y cuáles de las seleccionadas con anterioridad vamos a desechar por resultar innecesarias para el problema en cuestión. Esta tabla de limitaciones se realiza en caso de que nuestro modelo tenga muchas variables. Su uso es opcional y por lo general no suele usarse.

- Diagramas causales

Muestra una estructura del sistema formada por diferentes elementos, los cuales constituyen las variables, y qué relaciones se producen entre éstas. Este diagrama es necesario que se haga una vez se formula la hipótesis dinámica.

- Diagrama de Forrester o de Stocks y Flujos

Este diagrama enfatiza la relación física que se produce entre los elementos del sistema. Como hemos comentado anteriormente es necesario trasladar el digrama causal a un diagrama de Forrester. Éste constituirá nuestro modelo del sistema que trasladaremos al software adecuado para su posterior simulación.

3. Formulación del modelo de simulación

En la mayoría de los casos, el modelo construido resulta demasiado complejo como para saber cuál será el comportamiento que tendrá, es por ello por lo que necesitamos recurrir a simulaciones.

Es necesario también, la formulación de las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del sistema.

4. Pruebas

Las pruebas comienzan desde que se escribe la primera ecuación del modelo. Existen diferentes métodos para comprobar la validez del modelo construido, aunque no existe receta exacta a seguir. Depende de cada caso, del tipo de modelo que hayamos construido si es muy complejo, con muchos bucles de realimentación o es sencillo. Además de existir consenso en cuando un modelo resulta válido entre todas las partes que van a utilizar el mismo también debemos valorar qué pruebas debe pasar nuestro modelo para que resulte válido. Un modelo resulta válido si cumple con el objetivo que se planteó desde el principio y no por ser un modelo con muchas variables y que estas representen al cien por cien la realidad del sistema.

Como tipos de pruebas de validación más comunes a realizar se pueden mencionar.

- Comparación de modos de referencia: Se compara el resultado de la simulación con el comportamiento que debería tener basándose en datos históricos o predicciones hechas.
- Consistencia bajo condiciones extremas: El modelo debe devolver resultados coherentes si definimos variables con valores extremos, por ejemplo cero.

Existen diversos estudios y metodologías de validación de modelos aunque no entraremos en detalles por no existir estándar que diga si un método es más válido que el otro, sí mencionaré la siguiente referencia [Morvin, 2009] que recoge los principales y los resume según diversas teorías de validación.

5. Diseño de políticas y evaluación

Una vez que se ha construido un modelo en el cual se tiene confianza basándose en el comportamiento que devuelve, es posible construir políticas para mejorar procesos o solucionar ciertos problemas, es decir, lograr el objetivo para el cual habíamos diseñado el modelo. El diseño de políticas incluye la creación de nuevas estrategias, estructuras organizativas y reglas de decisión. El éxito para el diseño de las políticas consiste en la creación de diversos escenarios más o menos favorables en los cuales basaremos nuestra estrategia de decisión. Las interacciones de las diferentes políticas también deben ser consideradas. Dado que los sistemas reales son no lineales, el impacto de la combinación de políticas no suele ser la suma de sus efectos por sí solos y, a menudo, las políticas interfieren una con la otra.

El proceso de modelado es totalmente iterativo. Los resultados obtenidos en algún paso del proceso pueden aportar ideas que nos lleven a realizar revisiones y cambios en otros pasos [Figura5.1] [Sterman, 2000; Página 423].

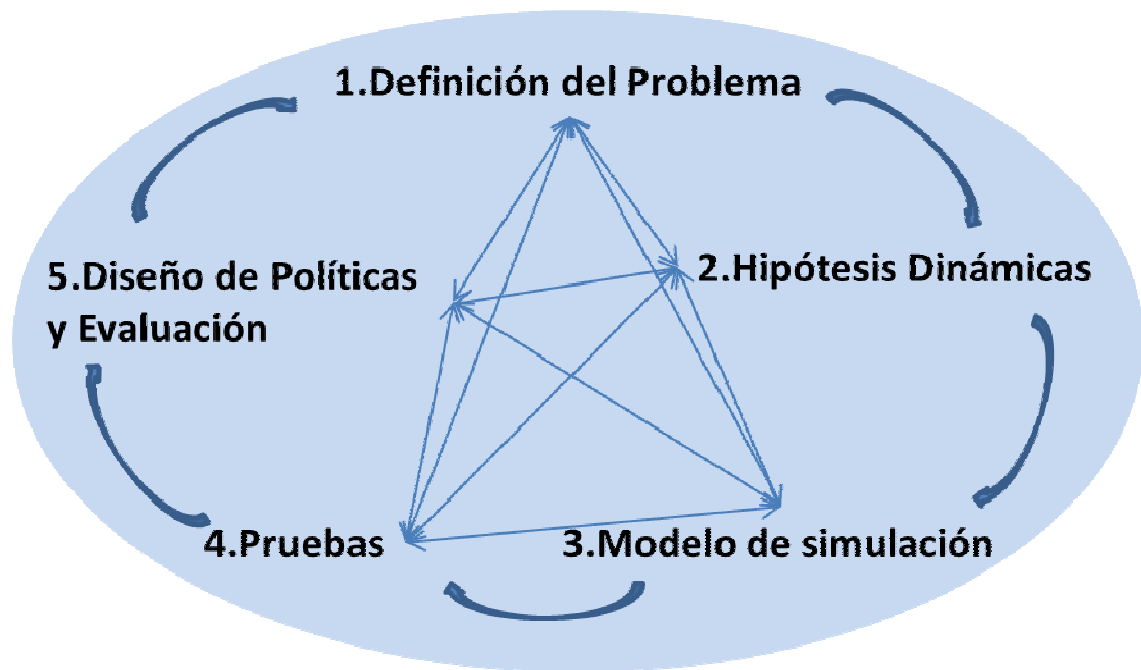


Figura 5.1 Proceso iterativo de modelado

Capítulo 6

Modelo de una cadena de suministro

6.1 Presentación del modelo del sistema

6.1.1 Introducción

A partir de este momento nos vamos a centrar en la presentación del modelo que se ha construido para la gestión de la cadena de suministro en un centro de producción. Éste constituye a su vez el trabajo principal que se muestra en el presente proyecto. También se va a tratar de explicar los principales pasos seguidos para su construcción, las partes en las que se divide el modelo, los elementos que lo integran y algunas ecuaciones características que definen el comportamiento del sistema modelado, así como la selección de las principales variables involucradas, de donde se obtienen los valores utilizados y algunos de los métodos empleados para su validación.

Por último, se ha construido una interfaz con gráficas y comandos interactivos para poder utilizar el modelo, se explicarán las partes de las que se compone, cómo utilizarla y para terminar se realizará la simulación del modelo para obtener diferentes escenarios que serán analizados, con el fin de demostrar las posibilidades que ofrece la construcción de modelos basados en Business Dynamics para la solución de problemas complejos en sistemas empresariales.

6.1.2 Establecimiento del problema y definición de objetivos

Dentro de los pasos del proceso de modelado, el establecimiento del problema y la definición de los objetivos resultan ser una parte importante si queremos construir un modelo que sea válido.

El origen del presente modelo procede de una necesidad detectada dentro de un centro de producción. En muchos casos, los tiempos de entrega de los productos terminados no se correspondían con lo previsto en un principio, existiendo por tanto retrasos en la entrega causados principalmente por tres factores que se detallan a continuación.

- Problemas de planificación

Éstos se producen bien por la ausencia de herramientas de gestión eficaz o también debido a modelos mentales de gestión erróneos por parte de las personas encargadas de gestionar y planificar la cadena de suministro así como de realizar previsiones fiables.

- Retrasos en la información

Como el propio nombre indica, son los que se producen porque la información no llega a tiempo, tanto en órdenes de pedido por parte del cliente, como pedidos del departamento de compras a los proveedores, pasando por retrasos en la comunicación interna del centro de producción, por ejemplo de necesidades de material según el plan de producción.

- Retrasos en los materiales

Los que se producen propiamente porque el material que se requiere no está ni en el lugar ni en el momento especificado cuando es preciso. Esto puede suceder en cualquier parte de la cadena de suministro o en varias partes simultáneamente.

Posteriormente, habiendo conocido la teoría de Dinámica de Sistemas, surge la oportunidad de construir un modelo del sistema, en concreto de la cadena de suministro del centro de producción, con el fin de poder ser utilizado como una herramienta estratégica de gestión. Esta herramienta nos permitirá construir diferentes escenarios más o menos optimistas o pesimistas con el fin de estar en la disposición de tomar decisiones para la gestión de dicha cadena de suministro.

El presente modelo una vez construido y validado permite conocer el “time to market” del producto que se va a fabricar, o lo que es lo mismo, la fecha de entrega al cliente. Lo cual constituye el objetivo final del modelo. Paliar los problemas que se presentaban y lograr una mejor planificación de la entrega del producto para evitar penalizaciones por parte de los clientes por incumplimientos del contrato.

Adicionalmente y aprovechando las posibilidades del modelo construido, se podrían alcanzar otros objetivos secundarios, como son el poder identificar los niveles de stock de productos intermedios o piezas en cada eslabón de la cadena de suministro o identificar los cuellos de botella y otros factores que afectan al comportamiento del sistema, con el fin de poder introducir mejoras en la gestión del mismo así como mitigar sus efectos en la producción.

Esta información se puede apreciar dentro de los escenarios construidos y simulados mediante el uso del modelo que se presenta. Cuando se explique el modelo en detalle se hará referencia a algunos resultados obtenidos que tienen que ver con niveles de stock e identificación de cuellos de botella.

6.1.3 Horizonte temporal

La variable tiempo es la clave de cualquier proceso que deseemos gestionar. Es necesario para determinar si un producto se retrasa o por el contrario cumple con los plazos establecidos. El tiempo es la variable de integración del sistema y su definición depende del establecimiento del problema que hayamos hecho y de los objetivos que se hayan marcado.

En este caso concreto, la variable de integración se medirá en días, pues es la unidad en la que se va a medir si el producto final llega con retraso o en el plazo indicado, ya que por lo general y en el modelo presentado, los plazos de entrega se miden en días completos laborables de 24 horas cada uno [Figura6.1].

El horizonte temporal viene determinado por la cantidad de días que serán necesarios simular para lograr una visión del proceso completo, esto es, desde que se produce el pedido por parte del cliente hasta que el producto terminado es entregado. En el caso que se presenta y dado que se trata de un modelo prototipo que simula los procesos de producción para un producto hipotético no definido, vamos a adoptar como horizonte temporal 100 días laborables [Figura6.1].

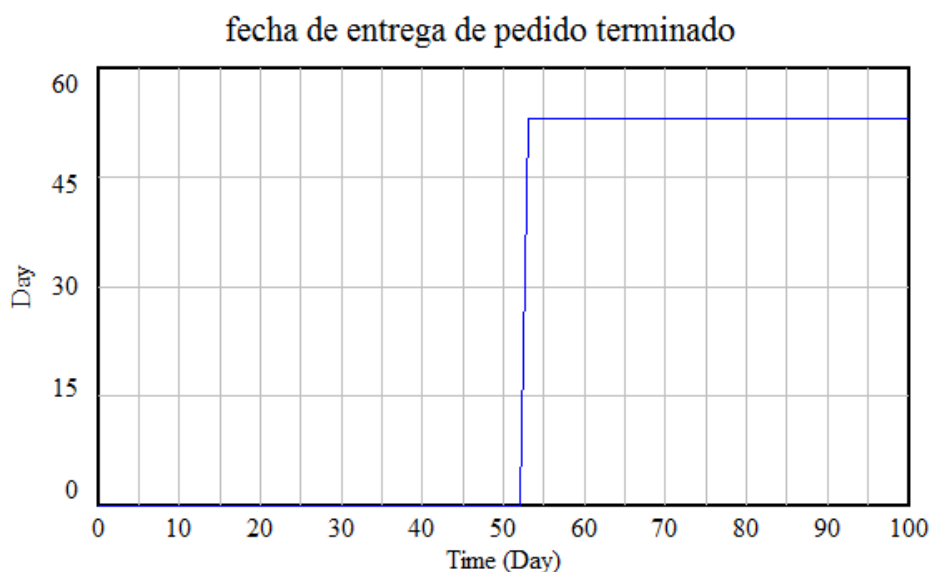


Figura 6.1 Variable de integración y horizonte temporal

6.2 Selección de variables

6.2.1 Medidores de actuación

Existen diferentes medidores tanto cualitativos, que reflejan conceptos difíciles de medir, como cuantitativos, que permiten ser medidos y mejorados. Dentro de los cuantitativos podemos encontrar el de 'Reducción del time to market' y consiste en la reducción del tiempo de entrega del producto terminado que nos ha pedido el cliente. Este irá íntimamente relacionado con el modelo que se ha construido, pues corresponde con el objetivo principal implícito en la construcción del mismo y por tanto será el que habrá que definir para realizar el seguimiento de cumplimiento del objetivo en el sistema real.

En el proceso de gestión que cobra forma gracias al empleo del siguiente modelo que estamos presentando, podemos ser capaces de diseñar políticas adecuadas para lograr los objetivos marcados anteriormente, así como valorar de qué manera se comporta nuestro medidor de actuación en la realidad e identificar qué cambios podemos o debemos implementar para mejorar éste basándonos en los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo del sistema. Dicho en otras palabras, si fijamos un medidor de actuación en el sistema real, podremos medir la eficiencia del sistema modelado para identificar en qué medida el uso del modelo de gestión está influyendo positiva o negativamente sobre nuestro sistema real.

6.2.2 Elementos del sistema

Tomando como base los objetivos marcados anteriormente en la definición de objetivos, para justificar la necesidad de construir el presente modelo y después del análisis realizado de la cadena de suministro en la empresa [Figura6.2], donde se identifican los elementos que constituyen la misma. Estamos en disposición de hacer una selección de los eslabones de la cadena de suministro que pueden impactar de cara al 'time to market' tanto positivamente como negativamente.

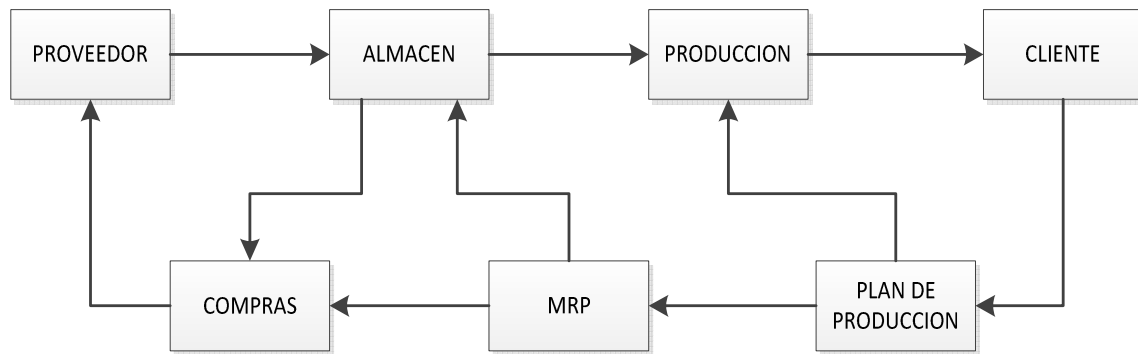


Figura 6.2 Estructura del sistema

Esto es que, para el desarrollo del presente modelo, resulta necesaria la construcción de una estructura que representa el sistema que vamos a modelar [Figura6.2], facilitando de esta manera la identificación de las relaciones de influencia que existen entre cada uno de los elementos que forman el sistema.

El diagrama de la estructura nos aporta una visión global sobre el sistema que se va a modelar, la cual es difícil de tener sin realizar este tipo de ejercicio debido a la percepción humana de considerar procesos de una manera lineal. Cada parte característica de éste influye en el objetivo marcado de reducción del ‘time to market’ tal y como explicamos a continuación.

- Cliente

Éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante retrasos de información, como pueden ser el envío de la confirmación del pedido con retraso o con cambios en lo establecido inicialmente, y es afectado con retrasos en los materiales, en el caso de que los productos pedidos no lleguen en el plazo previsto.

- Plan de Producción

Éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante problemas de planificación, como puede ser el producido por una gestión no adecuada, y es afectado por retrasos en la información como los

que provienen de retrasos entre que el pedido del cliente se realiza y la creación del plan de producción.

- MRP

Éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante problemas de planificación, ya que es posible que no se defina adecuadamente en el plazo necesario produciendo problemas en la cadena de suministro, y es afectado por retrasos en la información por ausencia de la información necesaria, como ejemplo no tener definido el número de elementos que van a integrar el pedido final.

- Departamento de Compras

Éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante retrasos de información, como el no pedir a tiempo las piezas que se requieren para la producción del producto, y es afectado por retrasos en la información como pueden ser el no conocer a tiempo las necesidades de material que se observan en función del MRP y la disponibilidad que el Almacén tiene de ellas.

- Proveedores

Éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante retrasos de los materiales, como son la llegada fuera de plazo de los elementos que constituyen el producto final, y son afectados por retrasos en la información, cuando no llega a tiempo el pedido de materiales por parte del departamento de compras.

- Almacén

Éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante retrasos de información, al MRP si no tiene actualizado su nivel de stock de cada artículo y retrasos en los materiales, si desconoce el momento en el que debe servir los materiales a la cadena de producción, y es afectado por retrasos en la información, si el plan de producción no es

adecuado e indica el momento en el que suministrar el material a producción, y retrasos en materiales, si el proveedor no entrega a tiempo la mercancía.

- Cadena de Producción

Por último, éste afecta al objetivo y a los demás elementos de la cadena de suministro mediante retrasos de los materiales, si el producto final no llega al cliente en el plazo indicado y es afectado por retrasos en los materiales, si los materiales que deben ser montados no están preparados en el momento requerido, o retrasos de información, si se producen cambios en el producto que introduce el cliente.

Como se puede apreciar tanto en la estructura del sistema como en la explicación de cada elemento, existen relaciones en forma de bucle, que indican que ciertos cambios en unos elementos afectan sobre otros y si se producen retrasos en algún eslabón de la cadena éstos afectarán a otros elementos. Una vez que se conocen los elementos del sistema, identificados gracias a la estructura del sistema presentada y conociendo como se interrelacionan, se construye el diagrama causal del sistema.

Debemos tener en cuenta que el modelo que se presenta se considera un prototipo y simula el proceso de producción de un producto hipotético dentro del centro de producción descrito. En este caso se considera un producto fabricado para el cual se necesitan tres proveedores diferentes que suministrarán cuatro piezas en diferente cantidad, tal y como se indica en la siguiente tabla [Tabla6.1].

El contenido de la tabla es necesario para la correcta comprensión del trabajo descrito en el presente proyecto. Cuando se haga referencia a P1, P2, P3 o P4, querrá decir que ese nombre o variable esta relacionado con la pieza que sea y en consecuencia con el proveedor que la misma tiene asociado.

Nombre del Proveedor	Nombre de la Pieza	Piezas x und. de producto
Proveedor 1	P1	1
Proveedor 2	P2	2
	P3	4
Proveedor 3	P4	4

Tabla 6.1 Material necesario para fabricar una unidad de producto

6.2.3 Variables características del sistema

Una vez que se han identificado los elementos característicos que intervienen en el sistema que deseamos modelar, es necesario identificar y seleccionar las variables clave que poseen cada uno de estos elementos. De esta manera seremos capaces de actuar sobre el comportamiento de cada parte del modelo con el fin de alcanzar un resultado final o comportamiento del sistema global como consecuencia de la relación que existe entre todas las partes del modelo.

A continuación se muestra la selección de variables que se ha realizado. Éstas serán clasificadas según el elemento de la cadena de suministro sobre el que actúan [Tabla6.2], [Tabla6.3], [Tabla6.4], [Tabla6.5], [Tabla6.6] y [Tabla6.7]. Hay que especificar que en las variables cuando ponga 'px' hace referencia a cualquiera de las piezas mencionadas en la tabla del apartado anterior P1, P2, P3 o P4. Las variables del elemento Cliente no existen, ya que no podemos actuar sobre el deseo de un cliente de hacer un pedido de determinados productos. Por el contrario, la variable que define el pedido del cliente se incluye en el elemento Plan de Producción.

Plan de Producción	Descripción de la variable
<i>Pedido del cliente</i>	Cantidad de producto pedido por el cliente
<i>Fecha de entrega de pedido terminado</i>	Fecha en la que está previsto la entrega de los productos pedidos en las instalaciones del cliente (Más que una variable es el medidor de actuación)

Tabla 6.2 Variables del elemento Plan de Producción

MRP	Descripción de la variable
Numero de piezas px por unidad de producto	Número de piezas de px que son necesarias para fabricar una unidad de producto

Tabla 6.3 Variables del elemento MRP

Compras	Descripción de la variable
Fecha de pedido px	Fecha en la que se lanzan los pedidos de las piezas px necesarias al proveedor

Tabla 6.4 Variables del elemento Compras

Proveedor 1, 2 o 3	Descripción de la variable
Capacidad de preparación px	Nivel de productividad, define el número de piezas px que pueden prepararse simultáneamente para fabricarse
Tiempo para preparar unidades px	Tiempo requerido para preparar las unidades de px definidas por la variable capacidad de preparación px
Capacidad de procesado px	Nivel de productividad, define el número de piezas px que pueden ser procesadas simultáneamente
Tiempo para procesar unidades px	Tiempo requerido para procesar las unidades de px definidas por la variable capacidad de procesado px
Tiempo para preparar envío px	Tiempo que se trata en preparar un envío de piezas px para ser enviado posteriormente al almacén
Stock de seguridad px	Número de piezas px de seguridad y listas para ser enviadas
Tiempo para entregar px	Tiempo que se tarda en entregar las piezas px terminadas al almacén

Tabla 6.5 Variables del elemento Proveedores

Almacén	Descripción de la variable
Stock inicial px	Número de piezas px que hay en el almacén antes del pedido del cliente
Capacidad de almacenaje px	Nivel de productividad que define el número de piezas px que que pueden ser almacenadas simultáneamente
Tiempo para almacenar px	Tiempo requerido para almacenar las unidades de px definidas por la variable capacidad de almacenaje px

Tabla 6.6 Variables del elemento Almacén

Cadena de Producción	Descripción de la variable
Capacidad de preparación de piezas por día	Se considera la capacidad de producción en el taller. Podría definirse en función del número de trabajadores.
Tiempo de envío	Tiempo que tarda el transportista en llevar el producto al cliente una vez esta terminado éste.

Tabla 6.7 Variables del elemento Cadena de Producción

Se entenderá mejor la utilidad de las variables seleccionadas cuando abordemos el punto 6.4 Partes del modelo y Diagramas de Forrester, donde se entra en detalle en la estructura del modelo del sistema que se construye para utilizarlo con el software de simulación. Será en este momento donde las variables listadas anteriormente serán necesarias, pues nos permitirán actuar sobre sus valores para observar diferentes comportamientos del sistema con el fin de lograr el objetivo definido anteriormente.

6.3 Diagrama Causal

6.3.1 Modelos mentales en la gestión de la cadena de suministro

Cada gestor posee su propio modelo mental de gestión en función de sus conocimientos adquiridos y experiencia a lo largo del tiempo. De entre todos ellos, los habrá más o menos válidos y que se ajusten más o menos a la realidad del sistema que se pretende gestionar. Es por ello que en el proceso de modelado no existe un modelo mental por excelencia para la gestión de la cadena de suministro que posteriormente sea convertido a un diagrama causal. En cada cadena de suministro o según el modelador, éste cambiará. Lo que si se debe recordar del apartado 3.3.5 Complejidad en la dinámica de sistemas, es el carácter que adopta cualquier sistema que vayamos a modelar. Es importante tener en cuenta, y así se ha intentado tener en el modelo que aquí se está presentando, que el comportamiento de un sistema complejo está gobernado por bucles de realimentación y que no existe linealidad en las influencias que poseen los elementos del sistema, entre otras características. Además, existen influencias que vienen determinadas por impactos de factores humanos como puede

serlo la productividad. Todo esto se debe tener en cuenta cuando se pretende construir un diagrama causal.

6.3.2 Presentación del diagrama causal

Una vez que tenemos identificados todos los elementos que componen el sistema debemos construir el diagrama causal que refleja todas las influencias que tienen unos elementos sobre otros. Se ha tenido que construir el siguiente diagrama causal [Figura6.3] utilizando una estructura propia del sistema que queremos modelar con bucles de realimentación, pues la gestión de una cadena de suministro es de carácter no lineal. En concreto, se presentan dos bucles de realimentación negativa, representados en el centro y a la derecha del diagrama, y un bucle de realimentación positiva que se encuentra a la izquierda. El presente diagrama causal sirve de base para construir el diagrama de Forrester o de stocks y flujos que constituiría el modelo de simulación propiamente dicho y que se explicará en el siguiente punto.

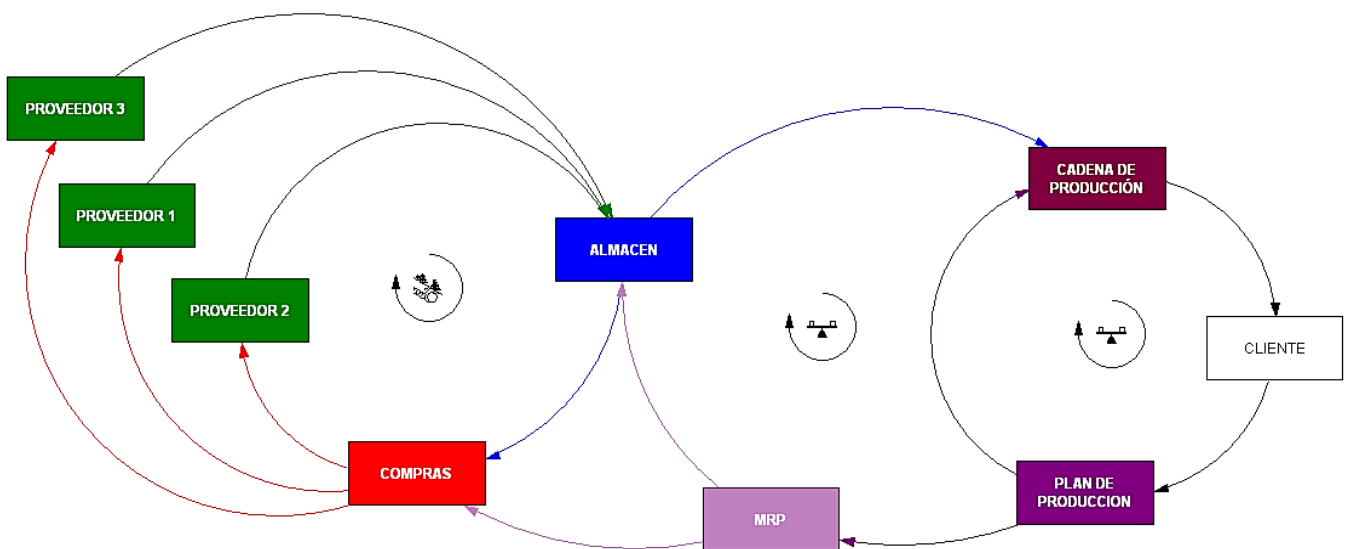


Figura 6.3 Diagrama causal para el modelo de la cadena de suministro.

Según se observa en el diagrama [Figura6.3] encontramos en primer lugar el elemento Cliente que influye sobre el Plan de Producción fijando la cantidad de unidades a fabricar. A mayor cantidad a fabricar, el Plan de Producción influye sobre la

Cadena de Producción para que ésta se ponga en marcha, basándose en el pedido del cliente. Una vez que se fabrican todos los productos estos serán enviados.

A su vez, el Plan de Producción hace que se activen el resto de elementos de la cadena de suministro, directa o indirectamente. Basándose en la información que se recibe del Almacén, si hay piezas suficientes éstas pasan a producción cuando son requeridas, en caso contrario Compras se basa en el MRP para hacer el pedido de los materiales a los Proveedores 1, 2 y/o 3 correspondientes. Si los Proveedores poseen los materiales en stock, éstos son enviados al Almacén. En caso contrario, se comienza el proceso de fabricación de las piezas pedidas y son enviadas cuando se reúnen todas las unidades que se habían pedido. Llegado este punto los materiales que se encuentran en el Almacén serán enviados a la Cadena de Producción en el momento requerido con el objetivo de elaborar el producto final. De este modo se cierra el ciclo de la cadena de suministro cuando el producto final es entregado al cliente.

En el digrama causal se aprecia un esquema de color, es decir, cada elemento del modelo tiene asociado un color determinado. Esto servirá cuando se expliquen los diagramas de Forrester del modelo y las relaciones que hay entre variables de un elemento del modelo y otro. Por ejemplo, las variables características, sobre las que podemos actuar, correspondientes a cada parte estarán representadas en el color de esa parte del modelo. Las flechas que unen los elementos del modelo irán representadas en el color correspondiente al elemento de origen del modelo, así seremos capaces de conocer de qué elemento de la cadena de suministro procede la variable que se está utilizando en otra parte del modelo.

El diagrama causal que hemos construido representa la estructura del sistema, así como las influencias que existen entre cada uno de sus elementos desde un punto de vista de alto nivel, pues el objetivo del presente proyecto consiste en la presentación del modelo final que al fin y al cabo constituye la herramienta de gestión que tiene una utilidad concreta. Se ha explicado el proceso de modelado con la teoría de Dinámica de Sistemas a lo largo del Capítulo 5 para que se comprendan los pasos que se están siguiendo pero también con el fin de poder obviar algunos de ellos llegados a este

punto. A raíz del diagrama causal de alto nivel se ha obtenido el modelo de simulación o diagrama de Forrester que se presenta en el siguiente punto.

6.4 Partes del modelo y diagramas de Forrester

6.4.1 Introducción

Una vez que tenemos el diagrama causal del sistema, debemos convertirlo a un diagrama de Forrester. Solo que en este caso estamos tratando con un sistema complejo y por tanto el diagrama de Forrester resultante lo será también, teniendo éste un gran número de variables, así como varias relaciones entre diferentes variables de stock, flujo o auxiliares.

En los siguientes apartados se van a presentar todos los diagramas de Forrester contruidos para cada elemento del sistema de manera individual. Para una mejor comprensión, además de para poder ver el modelo en su totalidad y las relaciones que existen, se recomienda consultar el Anexo I, donde se presentan los Diagramas de forrester en su totalidad constituyendo el modelo completo que se ha construido para gestionar la cadena de suministro.

Una vez que tenemos construido el diagrama de Forrester, debemos formular las ecuaciones matemáticas que van a describir el comportamiento del sistema. En los siguientes apartados se hará mención, en alguno de ellos, sobre alguna ecuación característica. No obstante se recomienda revisar el Anexo II donde se recogen todas las ecuaciones que han sido formuladas y que se utilizan en el presente modelo.

6.4.2 Parte asociada al Cliente

La parte del modelo correspondiente a Cliente como tal no existe. Se considera una manera ficticia de incluir al Cliente, pero en la realidad se tendrá en cuenta la variable

del Plan de Producción que hace referencia al ‘pedido del cliente’ [Figura4.4], como única relación que existe entre el cliente y el modelo. En otros modelos sucesivos se podría incluir en el modelo un módulo para la gestión del cliente, como puede ser una previsión de la demanda que previsiblemente puede tener el cliente.

6.4.3 Parte asociada al Plan de Producción

Esta parte del modelo se muestra a continuación [Figura6.4]. En este caso, hace las veces de interfase en la que se recoge el ‘pedido del cliente’ en forma de valor variable, según el caso, y de la variable ‘fecha de entrega de pedido terminado’ donde el modelo una vez simulado devolverá el time to market que se produce, lo que se considera el medidor de actuación del sistema que queremos gestionar.



Figura 6.4 Parte asociada al Plan de Producción

La variable ‘fecha de entrega de pedido terminado’ será la variable característica que utilizaremos para definir si los diferentes escenarios que simularemos son más o menos bondadosos o, por el contrario, no se consigue reducir el ‘Time to market’. El escenario que mejor resultado provea será considerado como el plan de producción que se deberá seguir, o lo que es lo mismo, el escenario más favorable se utilizará para la adopción de las políticas de decisión en la gestión de la cadena de suministro que hemos modelado. Como regla general y en adelante las variables sobre las que se puede actuar son las que están en color, es decir, las que no se presentan en negro o en gris. Estas últimas serán variables auxiliares cuyo valor vendrá determinado por una ecuación del mismo modo que las variables de Stock y Flujo. Para su correcta identificación se van a señalar las variables auxiliares con una estrella [Figura6.5].

6.4.4 Parte asociada al MRP

A continuación se muestra el Diagrama de Forrester [Figura6.5], de la parte del modelo correspondiente al MRP, Material Requirements Planning.

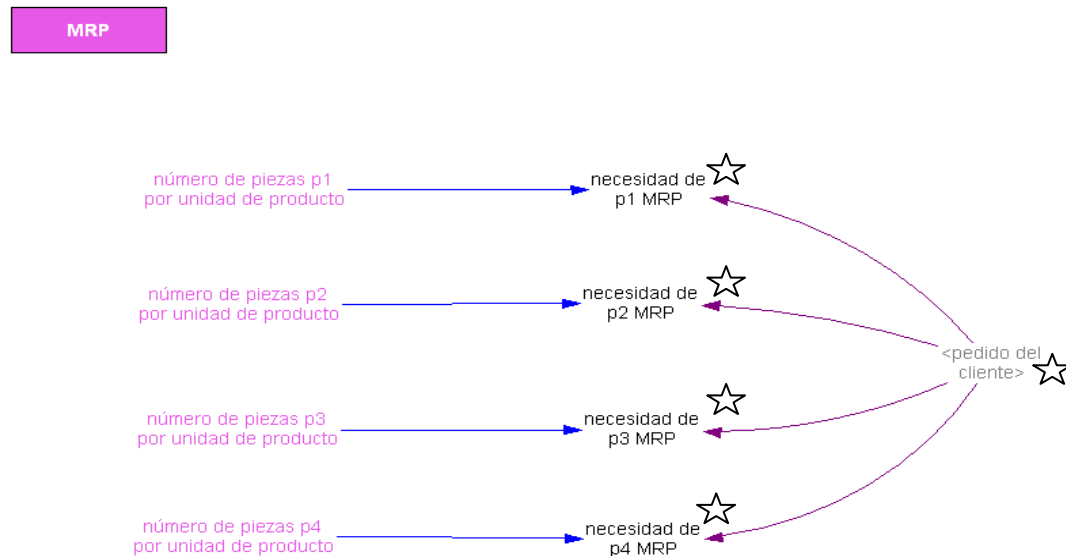


Figura 6.5 Parte asociada al MRP

Como se comentó anteriormente, gracias a un MRP se puede saber la cantidad de material necesario para fabricar un producto determinado. En este caso, se utiliza esta parte del modelo para precisamente eso, conocer qué cantidad de cada uno de los tipos de piezas será necesario para fabricar una unidad de producto final, además de conocer la cantidad que habrá que pedir a los proveedores.

Las variables que aparecen en el diagrama se usarán en ecuaciones formuladas en otras partes del modelo. El funcionamiento de esta parte del modelo se explica de la siguiente manera. Las variables 'necesidad de p_x MRP', donde ' x ' puede ser 1, 2, 3 ó 4, se calculan multiplicando el número de productos finales que pide el cliente, variable 'pedido del cliente', por cada uno de las piezas p_1 , p_2 , p_3 y p_4 necesarias para fabricar un único producto. De aquí se obtiene el pedido que será necesario hacer a cada proveedor por parte de compras, pero descontando antes el número de piezas que existen en el almacén como se verá más adelante.

6.4.5 Parte asociada a Compras

A continuación se muestra el Diagrama de Forrester [Figura6.6], de la parte del modelo correspondiente a Compras. Gracias a esta parte seremos capaces de actuar sobre el departamento de Compras modificando sus variables características. En este caso concreto podemos modificar la variable ‘fecha de pedido px’, donde ‘x’ puede ser 1, 2, 3 ó 4, ajustando la fecha en la que se produce el pedido de cada tipo de pieza al proveedor correspondiente. De esta manera se pueden tener en cuenta los retrasos que se producen desde que se conocen las necesidades de material y la fecha en la que finalmente se realiza el pedido.



Figura 6.6 Parte asociada a Compras

La cantidad de piezas a pedir vienen determinadas por las variables ‘unidades a pedir px’, donde ‘x’ puede ser 1, 2, 3 ó 4, tal y como se explicó en el punto anterior. Su valor será la diferencia entre las necesidades que marca el MRP y la cantidad que existe en el almacén. La variable ‘unidades pedidas px’ se considera igual que la variable unidades a pedir, solo que se introduce para que conste como unidades que ha pedido el departamento de compras a los proveedores y se producirá en la fecha que se haya fijado con la variable ‘fecha de pedido px’.

6.4.6 Parte asociada al Proveedor

Esta parte o elemento del sistema modelado y su diagrama de Forrester se considera uno de los más grandes e importantes tal y como se puede apreciar viendo su diagrama [Figura6.7] junto con la parte de Almacén y Cadena de Producción. Esto no quiere decir que el resto de elementos del modelo no sean importantes, pues cada variable contenida en éstos posee cierto grado de impacto en la totalidad del modelo que hace que el comportamiento final de éste se vea afectado de una u otra manera.

En el modelo completo, tal y como se aprecia en el Anexo I, se puede observar que la parte de Proveedor está formada por cuatro Diagramas de Forrester semejantes que hacen referencia a cada uno de los cuatro proveedores ‘tipo’ que se han querido modelar en el presente proyecto. Estos son Proveedor 1, 2 y 3. Aquí se explica el funcionamiento del diagrama del primero de ellos ya que comprendiendo uno se comprende el resto.

Existen ciertas variables características para la parte del modelo asociado al Proveedor, mostradas en color verde [Figura6.7], y serán sobre las que podremos actuar modificando su valor con el fin de simular diferentes escenarios.

La idea de construir así el diagrama del Proveedor [Figura6.7] es porque se ha querido tener en cuenta dentro de la cadena de suministro al proveedor y sus procesos, incluyendo así las variables características de éste y ser capaces de ver en qué medida afectan el ajuste de estas variables sobre el ‘Time to market’ que se tendrá en el centro de producción para el cual se ha desarrollado el modelo. Se parte de la premisa de que conocemos o podemos conocer la información referente a los procesos de negocio de los proveedores ya que se considera muy importante la existencia de un flujo de información transparente y bidireccional entre los principales actores de la cadena de suministro con el fin de poder diseñar políticas de gestión óptimas. Esto es algo a lo que se está tendiendo con el uso de sistemas de información en tiempo real que involucran tanto a proveedores como a clientes.

El Diagrama de Forrester dedicado al Proveedor presenta cuatro grandes bloques. Estos bloques son los cuatro principales procesos de negocio que posee el proveedor y que a su vez corresponden con las cuatro variables de stock que se pueden observar [Figura6.7], 'Unidades para procesar px', 'Unidades en proceso px', 'Inventario de unidades procesadas px' y 'Unidades de px preparadas para enviar', donde 'x' puede ser 1, 2, 3 ó 4.

El proveedor entra en acción una vez se ha comparado el 'stock de seguridad px' que éste tiene en su almacén con las 'unidades pedidas px' por parte de compras. En caso de resultar positiva la discrepancia, la diferencia entre stock y pedido, se comienza con el proceso de producción de las piezas necesarias para completar el pedido del cliente. El cliente resulta ser en este caso el centro de producción para el que se construye el modelo y el pedido se realiza en la 'fecha de pedido px' proveniente de compras, representado con una flecha de color rojo, color con el que se ha definido el elemento compras. Esto resulta extensible para el resto de elementos que componen el modelo. Es decir para saber de que parte del modelo procede la variable que se utiliza hay que fijarse en el color de la flecha y asociarlo al color del elemento del modelo que le corresponda.

Una vez se ha puesto en marcha el proveedor, entra en juego el primer proceso 'Unidades para procesar px', que representa la etapa necesaria para preparar todo lo necesario para comenzar a producir las piezas 'px' que son requeridas. Este proceso se ve limitado por la variable 'capacidad de preparación px' y 'tiempo para preparar unidades de px', que no son más que variables de productividad inherentes por ejemplo a los trabajadores que posee el proveedor. Así las piezas que van siendo preparadas pasan al siguiente proceso 'Unidades en proceso px' a través de la tasa de preparación, definida por la siguiente ecuación.

Tasa de preparación px=MIN (capacidad de preparación p1, Unidades Para Procesar P1 / TIME STEP)*(PULSE TRAIN (fecha de pedido p1, 1, tiempo para preparar unidades de p1 , FINAL TIME))

Esta ecuación indica el flujo de piezas que pasan de estar listas para procesar a la etapa de procesado. La ecuación calcula la cantidad mínima de piezas 'MIN' entre

‘Unidades para procesar px’ y ‘capacidad de preparación px’ lo que indica que no se pueden pasar a producción más piezas de las que la capacidad propia del primer proceso permite y, a su vez, por mucha capacidad que se disponga, no se podrá pasar a producción más piezas de las que estén listas para procesar. El ‘PULSE TRAIN’ se utiliza para crear un tren de pulsos en función del ‘tiempo para preparar unidades de px’ y a partir de la ‘fecha de pedido px’, lo que hace que las unidades listas para procesar pasen a ser procesadas cuando haya pasado el tiempo que se tarda en preparar éstas.

Se ha explicado la ecuación de ***Tasa de preparación px*** para comprender mejor el modelo que se muestra y que quede constancia de que el comportamiento del sistema se obtiene a través de una serie de ecuaciones que se han introducido en el modelo. La totalidad de las ecuaciones empleadas se encuentran reflejadas en el Anexo II y que al ser tantas resulta inviable explicar una por una. Para mayor información acerca de las fórmulas empleadas es posible consultar la lista de resumen de funciones que posee el software Vensim PLE 5.0 como MIN, PULSE TRAIN, TIME STEP.

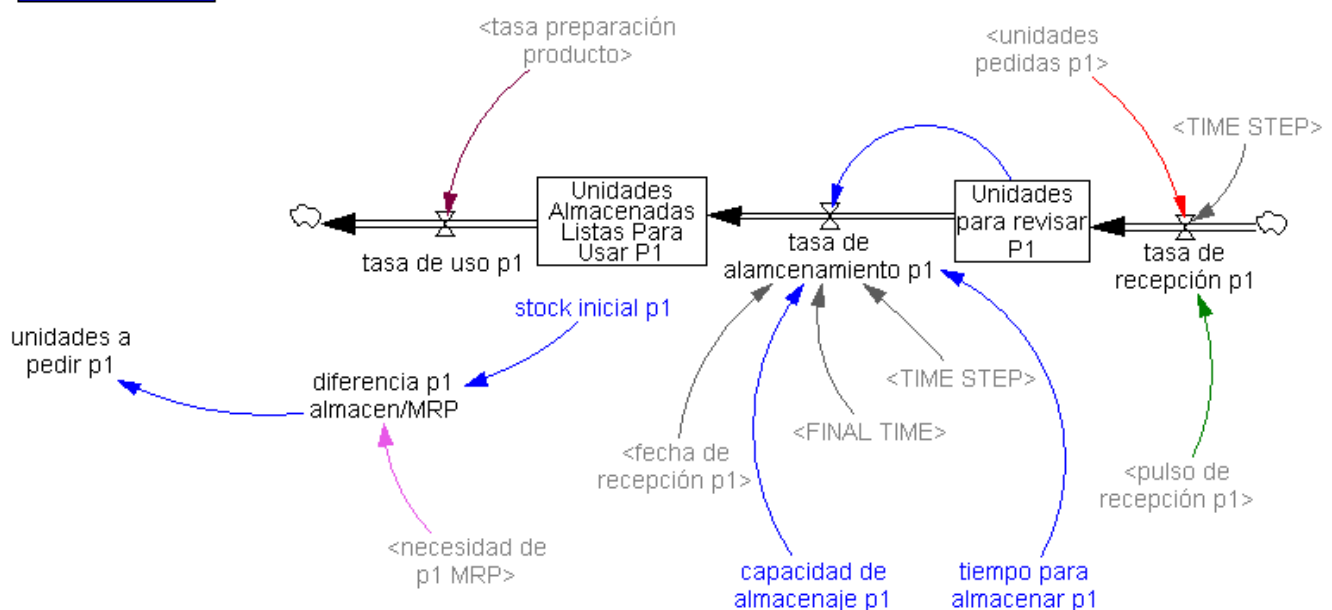
Del mismo modo que con el proceso ‘Unidades Para procesar px’, el proceso ‘Unidades en proceso px’ se verá limitado por las variables ‘capacidad de procesado px’ y ‘tiempo para procesar unidades px’.

A continuación, el proceso ‘Inventario de unidades procesadas px’ que representa la cantidad de piezas procesadas y a la espera de ser preparadas para ser enviadas, se ve limitado por la variable ‘tiempo para preparar envío px’. Así, hasta llegar al último proceso del proveedor ‘Unidades de px preparadas para enviar’ donde se recogen las piezas que están listas para ser enviadas a los almacenes del centro de producción.

Hay que tener en cuenta que en este caso se ha considerado que el envío de las piezas ‘px’ pedidas se realiza cuando se tiene la totalidad del pedido preparado. Se podría considerar como una variación la posibilidad de ir enviando la mercancía al almacén del centro de producción según se van teniendo fabricadas las piezas ‘px’ o incluso en lotes de cierta cantidad de piezas que se definan. El envío de la mercancía en última instancia se ve afectado por el ‘tiempo para entregar px’ que dependerá del

operador logístico y su eficiencia impactando por tanto al 'lead time' final que se tendrá para las piezas 'px,' ésto se considera una información importante en la cadena de suministro a la hora de planificar la producción. Hay que decir que en este caso el 'lead time' se calcularía restando la variable 'fecha de pedido' a 'fecha de recepción'. El 'Lead time' se considera como la suma de todos los tiempos empleados en cada uno de los procesos involucrados desde que el pedido es realizado hasta que la mercancía es entregada en el almacén del centro de producción.

A continuación se muestra el Diagrama de Forrester [Figura6.8] de la parte del modelo asociado al Almacén.



Este diagrama presenta dos bloques principales, ‘Unidades para revisar px’ y ‘Unidades almacenadas listas para usar px’, donde ‘x’ puede ser 1, 2, 3 ó 4. El primero de ellos es donde se recoge el stock de piezas ‘px’ que llegará desde el proveedor correspondiente mediante la ‘tasa de recepción px’ que no es más que el flujo de

entrada al almacén de piezas. Esto se produce cuando llega el ‘pulso de recepción px’, variable auxiliar utilizada para el funcionamiento del modelo que indica el momento en el que se recibe la mercancía por parte del proveedor. El pedido de piezas llega cuando éste está completo y se materializa la llegada al almacén mediante la ‘tasa de recepción px’.

Una vez que las piezas se encuentran en el almacén, hay que revisarlas, comprobarlas, almacenarlas pertinentemente o lo que es lo mismo, almacenarlas listas para ser usadas por la cadena de producción. Este proceso se ve limitado por unas variables que denotan la productividad del personal del almacén en función del tipo de pieza que se trate. Éstas son ‘capacidad de almacenaje px’ y ‘tiempo para almacenar px’ utilizadas en la ‘tasa de almacenamiento px’ que es el flujo que simboliza lo que acabamos de explicar y que posee una ecuación parecida a la que se explicó en la parte del modelo asociado a Proveedores, ‘Tasa de preparación px’. Para ver las ecuaciones que representan a cada variable consultar el Anexo II.

El número de piezas que Compras debe pedir a los proveedores se obtiene mediante el uso de la variable auxiliar ‘diferencia px almacen/MRP’ que resta la necesidad descrita en el MRP al stock inicial que existía en el almacén de la pieza ‘px’.

La variable ‘tasa de uso px’ es el flujo de piezas ‘px’ listas para usarse en la cadena de producción. Según el tipo de pieza que se trate, se necesitará una cantidad diferente de ellas en cada etapa del proceso de producción y se irán sacando las piezas ‘px’ del almacén, ‘Unidades almacenadas listas para usar px’, en el momento que sean necesarias y según las ecuaciones formuladas que definen este comportamiento. En este caso [Figura4.8] la ‘tasa de uso p1’ es igual que la ‘tasa de preparación producto’ primer proceso de la cadena de producción que viene definida por la siguiente ecuación.

Tasa de preparación producto= IF THEN ELSE (stock inicial p1>necesidad de p1 MRP, necesidad de p1 MRP*PULSE (0,1), MIN (capacidad de preparación de piezas por día, Unidades Almacenadas Listas Para Usar P1))/TIME STEP

Esta ecuación indica el flujo de piezas que pasan del almacén al Proceso 1 de la cadena de producción donde se utilizan las piezas p1 para ser preparadas e ir incorporando en los sucesivos productos el resto de piezas p2, p3 y p4. Se trata de una ecuación condicionada por IF THEN ELSE. Si 'stock inicial p1' es mayor que la 'necesidad de p1 MRP' entonces se procede a enviar todas las piezas de p1 al Proceso 1 [Figura6.10] para que sean preparadas mediante 'necesidad de p1 MRP' multiplicado por 'PULSE (0,1)'. En caso contrario se envía al Proceso 1 el mínimo número de piezas entre 'capacidad de preparación de piezas por día' y 'Unidades Almacenadas Listas Para Usar P1'. Esto quiere decir que no se van a poder enviar al Proceso 1 más piezas de las que se tengan o de las que se sea capaz de enviar al día, por tanto existen limitaciones.

Como se puede observar en el Diagrama de Forrester del Almacén destinado a las piezas p2, p3 y p4 [Figura6.9], existe una pequeña diferencia en las variables que se tienen en cuenta para la 'tasa de uso px' donde 'x' puede ser 2, 3 y 4. Esto es así debido a que serán necesarias más de una unidad de pieza 'px' por unidad producto final a producir. Por tanto, la ecuación que define a 'tasa de uso px', donde 'x' será 2, 3 o 4, se define a continuación.

Tasa de uso p2= tasa de procesado 1*número de piezas p2 por unidad de producto

En este caso 'tasa de procesado 1' hace referencia al flujo de piezas 'p2' que son requeridas por el Proceso 2 de la cadena de producción donde se incorporan estas piezas, en la cantidad necesaria y según se van recibiendo, a las piezas 'p1' que salen ya preparadas del proceso 1. Análogamente se poseen las variable 'tasa de procesado 2' y 'tasa de procesado 3' usadas para enviar piezas al 'Proceso 3' y al 'Stock de Producto Terminado' respectivamente. Esto se verá en más detalle en el apartado siguiente, 6.4.8 Parte asociado a Cadena de Producción.

En el Anexo II aparecen recogidas todas las ecuaciones formuladas para cada una de las variables que poseen los diagramas de la Parte del modelo asociado a Almacén, entre otras.

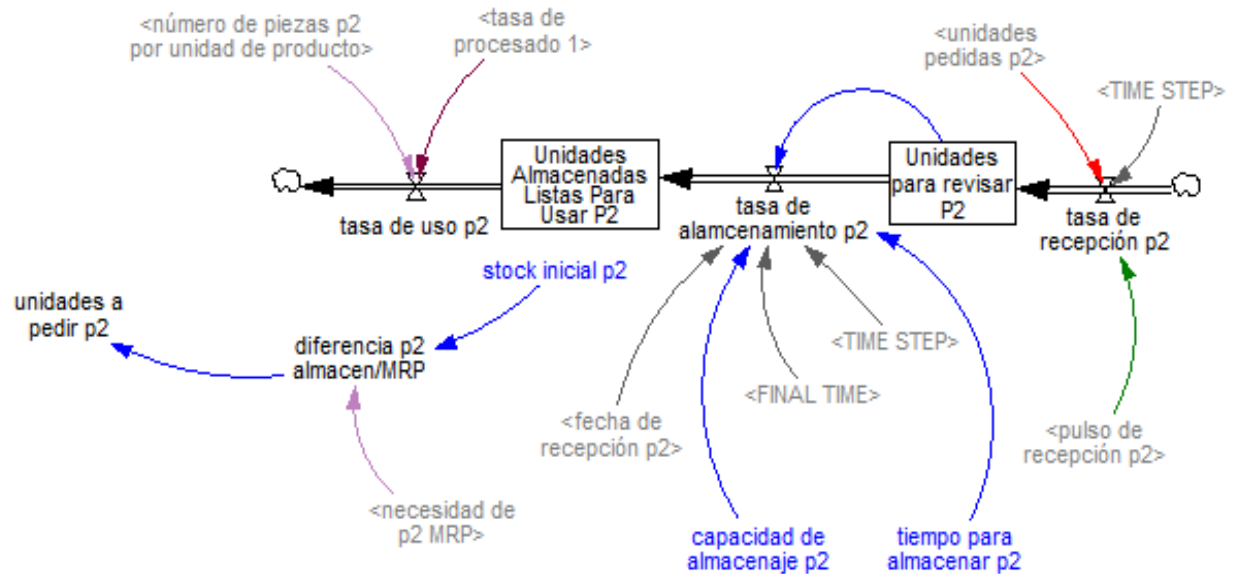


Figura 6.9 Parte asociada a Almacén p2, p3 y p4

Hay que añadir que, al igual que ocurría en Proveedores, existen cuatro diagramas de Forrester de Almacén dedicado cada uno de ellos a un tipo de pieza 'px' donde 'x' puede ser 1, 2, 3 ó 4 y se considera que cada uno de estos diagramas podría ser como una parte del almacén general que se destina al almacenamiento de la pieza 'px' en cuestión.

6.4.8 Parte asociada a Cadena de Producción

Para concluir este punto, se presenta la parte del modelo asociado a la cadena de producción. Este representa el eslabón principal de la cadena de suministro donde se va a fabricar el producto final que ha pedido el cliente y donde es preciso que todos los materiales se encuentren listos para ser usados en el momento adecuado.

El Diagrama de Forrester de la cadena de producción [Figura6.10] presenta cuatro bloques principales, estos son el Proceso 1, Proceso 2, Proceso 3 y Stock Producto Terminado.

El Proceso 1 representa la llegada de piezas 'p1' y su preparación a través del flujo de piezas definido por la 'tasa de preparación producto'. La variable que marca el ritmo

de producción, lo que sería la capacidad de la cadena y de los trabajadores al mismo tiempo, es la variable 'capacidad de preparación de piezas por día', además del hecho de que estén o no disponibles las piezas necesarias en el Almacén, 'Unidades almacenadas listas para usar p_x '. El montaje de las piezas 'p2' correspondientes a cada una de las piezas 'p1' esta definido por la 'tasa de procesado 1' y está formulada con la siguiente ecuación.

$$\textbf{Tasa de procesado 1} = \text{MIN} (\text{cadencia de producción proceso 1, Proceso 1}) / \text{TIME STEP}$$

Según la ecuación, 'Tasa de procesado' viene determinado por la cantidad mínima de piezas entre 'cadencia de producción proceso 1' y las que hay en el Proceso 1 debido a que si existen cero unidades en Proceso 1 no se puede producir nada. En el caso de 'cadencia de producción proceso 1' se formula la siguiente ecuación.

$$\textbf{Cadencia de producción proceso 1} = \text{INTEGER} (\text{ZIDZ} (\text{Unidades Almacenadas Listas Para Usar P2, número de piezas p2 por unidad de producto}))$$

La 'cadencia de producción proceso 1' se considera a la posibilidad de procesar un cierto número de producto intermedio en función de si existe la cantidad de piezas 'p2' necesarias para no paralizar el proceso de producción. Para esto se dividen las 'Unidades almacenadas listas para usar p2' entre el numero de piezas p2 por unidad de producto' con resultado en valores enteros ya que son piezas discretas las que se usan, es decir, no existen piezas decimales, para ello se usan las funciones de Vensim siguientes INTEGER (ZIDZ (ecuación)).

Hay que expecificar que la cadena de producción modelada aquí consiste en un sistema de producción tipo taller que trabaja bajo pedido y por tanto se requieren operaciones poco especializadas, las cuales son realizadas por un mismo operario o por un grupo pequeño de ellos. Esto se identifica con la 'cadencia de producción proceso x', donde 'x' puede ser 1, 2 o 3, donde lo que sucede es que los operarios trabajan en los diferentes procesos hasta que se ven limitados por la falta de piezas. Esta falta de piezas va a determinar la cadencia de producción que se tiene en cada proceso y no se va a poder ir mas rápido ya que donde habrá que mejorar es en los retrasos que están sufriendo las piezas tanto en el tiempo que se tarda en suministrar por parte del

CADENA DE PRODUCCION

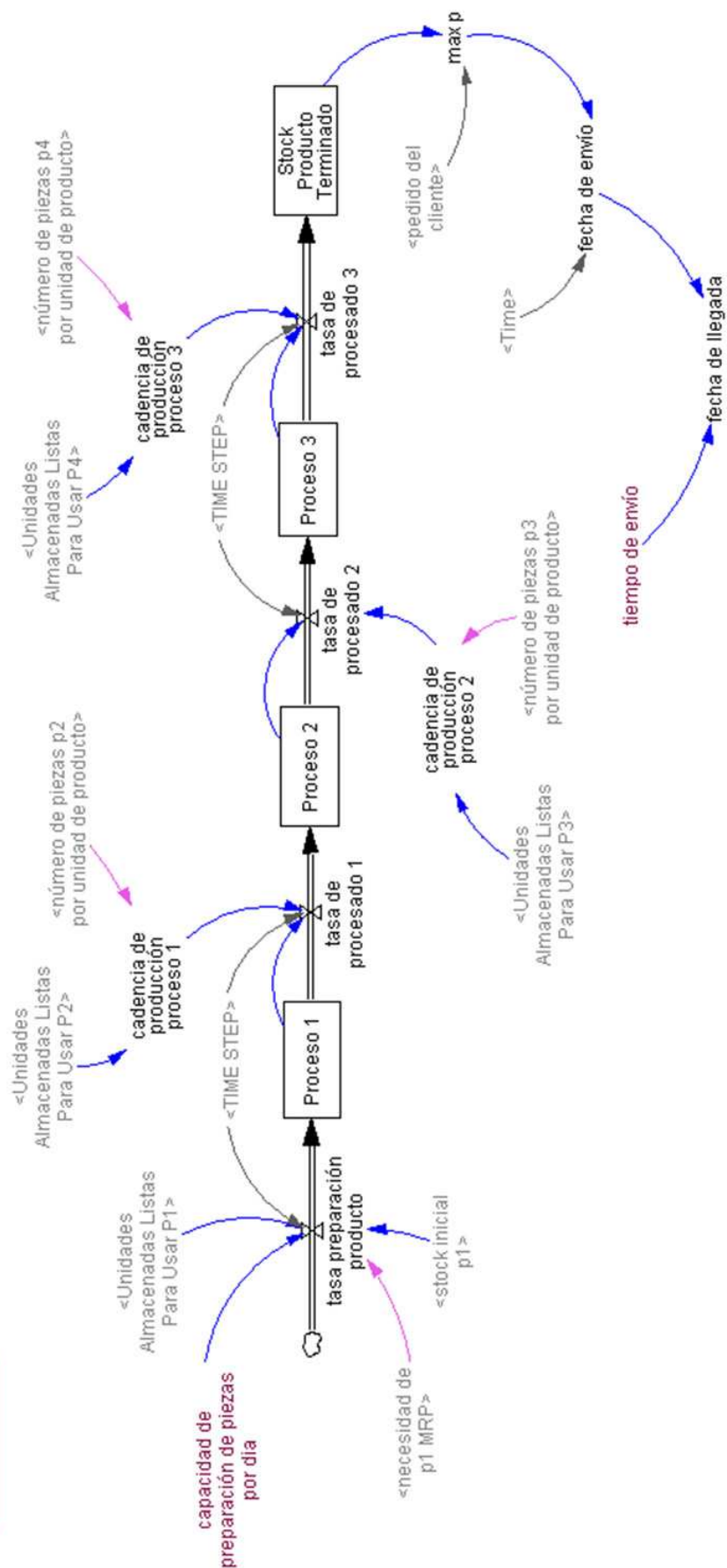


Figura 6.10 Parte asociada a Cadena de Producción

proveedor como en el tiempo que se tarda desde que las piezas 'px' llegan al almacén hasta que están listas para ser utilizadas en los procesos de la cadena de producción.

El 'Proceso 2' y el 'Proceso 3' son análogos al 'Proceso 1' en cuanto a funcionamiento se refiere, solo que en cada caso habrá que sustituir la pieza 'p2' por las piezas 'p3' y 'p4' cuando corresponda.

Por último se tiene el bloque de 'Stock Producto Terminado', donde está la cantidad de producto terminado a la espera de completar el pedido para ser enviado al cliente. Cuando el pedido se completa, representado por la variable 'max p', se devuelve la fecha en la que se produce el envío de la mercancía a través de la variable 'fecha de envío'. Lo que realmente nos interesa saber es la fecha en la que le llega el pedido al cliente o lo que es lo mismo el 'Time to market'. En este caso, la variable característica será 'Fecha de Llegada', que se verá condicionada por el 'tiempo de envío' que depende de la eficiencia del operador logístico encargado del flete.

6.5 Obtención de datos

6.5.1 Caso Real

Para la construcción de un modelo con aplicaciones reales es importante disponer de una serie de datos relativos al sistema que se desea modelar, estos serán.

- Datos e información relativa a los procesos involucrados en la empresa, en este caso el centro de producción. Obtención mediante entrevistas con cada una de las partes encargadas de gestionar los procesos de la empresa.
- Datos e información relativa a los procesos y variables características de los proveedores. Obtención mediante el uso de sistemas de información transparentes y bidireccionales.

- Valores históricos de las variables características que se han seleccionado para el modelo, tanto del centro de producción como de los proveedores. Gracias a la recopilación de estos datos en caso de que se disponga de bases de datos.
- Valores de las variables que se puedan obtener empíricamente mediante, por ejemplo, técnicas de métodos y tiempos, entre otros.

Todos estos datos nos sirven para poder construir un modelo que se asemeje lo máximo posible a la realidad del sistema que deseamos modelar y también para el siguiente punto, 4.6 Validación del Modelo. Además se usarán en la simulación del modelo para variables que tengan valores definidos.

6.5.2 Caso Hipotético

El modelo que estamos presentando para la gestión de la cadena de suministro en un centro de producción se trata de un prototipo. La idea es mostrar la utilidad que tiene la construcción de modelos de simulación de este tipo para aplicaciones reales en la gestión de procesos en entornos empresariales y solución de problemas complejos. Además, no se ha podido tener acceso a todos los datos que habrían sido necesarios para poder aplicar el modelo a un uso real. Es por esto que en referencia a la forma en la que se han obtenido, para el presente modelo, los diferentes tipos de datos comentados en el apartado anterior, podemos decir lo siguiente.

- Datos e información relativa a los procesos del centro de producción.

Esta información se ha obtenido basada en la experiencia de haber estado trabajando en el centro de producción en cuestión. Esto ha permitido conocer de primera mano el funcionamiento de los diferentes procesos involucrados en la empresa y ser capaz de construir el modelo de simulación y su diagrama de influencias.

- Datos e información relativa a los procesos y variables características de los proveedores.

Se trata de una hipótesis que se ha realizado basada en cómo podrían ser los procesos que siguen los proveedores para la fabricación de las piezas demandadas y sus variables características para poder construir el modelo que lo relaciona.

- Valores históricos de las variables características que se han seleccionado para el modelo, tanto del centro de producción como de los proveedores.

Estos valores se obtienen mediante hipótesis basadas en la experiencia obtenida después de haber trabajado en el centro de producción.

- Valores de las variables que se puedan obtener empíricamente.

Son datos que resultan imposibles de obtener sin ponerme en contacto con el centro de producción.

A pesar de no disponer de todos los datos, el modelo ha sido construido y aunque los resultados que se obtengan de las simulaciones no serán válidos para que el centro de producción para el cual ha sido creado el modelo diseñe políticas de gestión fiables, sí que se pueden apreciar las ventajas que ofrece el modelo gracias a la simulación de los escenarios que se realizarán más adelante. Se verá qué impactos tienen los cambios que se producen en las variables del sistema sobre el comportamiento de la cadena de suministro.

6.6 Validación del modelo

6.6.1 Importancia de la validación

La idea de validar el modelo construido consiste en ser capaces de obtener un nivel de confianza en los resultados que se obtengan de su simulación tal que seamos capaces

de utilizar el modelo para una aplicación real y estar en disposición de tomar decisiones en la gestión de la cadena de suministro en función de los diferentes escenarios simulados.

En este caso, se han realizado una serie de tests para validar el modelo pero no los suficientes como para darle una aplicación real debido a la falta de ciertos datos relevantes del sistema modelado y por el carácter de prototipo que presenta el modelo construido.

Existen diferentes teorías y opiniones en cuanto a la validación de modelos se refiere [Morvin, 2009], de las cuales considero remarcables las siguientes.

“La validación y verificación es imposible, el énfasis debe ir dirigido hacia el testeo de los modelos. Es decir, ver si el proceso para obtener confianza sobre el modelo es apropiado para el propósito que tiene el modelo construido. Algunos modelos pueden ser mejores que otros, algunos modelos aunque no sean completamente válidos pueden poseer mayor grado de autenticidad que otros. Adicionalmente, todos los modelos son, en alguna medida, erróneos porque siempre habrá un test con el que no cumpla en el grado de conformidad deseado” [Sterman, 2000; página 845].

“El nivel de confianza en el modelo se incrementa gradualmente según el modelo va pasando más tests” [Forrester y Senge, 1980].

Estas opiniones entroncan con la idea de que un modelo es válido si cumple con los objetivos para los que fue diseñado.

6.6.2 Esquemas de validación utilizados

Para proceder a la validación del modelo antes hay que especificar que existen diversos esquemas de validación propuestos por diferentes expertos en la materia pero no hay nadie que pueda asegurar que unos son más eficaces que otros. Un esquema de

validación no es más que una serie de tests con diferentes objetivos para lograr conseguir una confianza en el modelo construido. Además la selección de los esquemas de validación depende totalmente del criterio y gusto del modelador.

Para la validación del presente modelo se han utilizado los esquemas de validación propuestos por Forrester y Senge [Morvin, 2009], los cuales se dividen en cuatro etapas. Hay que añadir que al modelo no se le han podido aplicar toda la batería de tests que se proponen debido a la falta de datos. A continuación se especifican los test empleados.

1. Importancia de los objetivos del modelo

Se ha pretendido que los objetivos marcados sean correctos y realistas, además de suponer éstos una información relevante en la gestión de la cadena de suministro, pues conocer el 'Time to market' es una información estratégica que puede hacer ahorrar costes y conocer con anticipación si se está en condiciones cumplir con la petición del cliente.

2. Validación de la estructura del modelo

Tienen como objetivo establecer la confianza en la estructura del modelo construido.

- Tests o pruebas de idoneidad

Validación de la estructura: La estructura del modelo ha sido construida basada en el conocimiento adquirido acerca de los procesos involucrados. Se puede afirmar que la estructura de los procesos implícitos al centro de producción se ajusta a la realidad, aunque se trata de un prototipo y por tanto se han omitido ciertos procesos. La estructura diseñada para los proveedores se trata de una hipótesis que intenta mostrar procesos genéricos de un proveedor cualquiera.

Prueba dimensional: Se ha comprobado la consistencia dimensional de todas las unidades que poseen las ecuaciones que se han formulado y que modelan el comportamiento del sistema.

Prueba de condiciones extremas: Se ha comprobado para cada estructura del modelo que si se aplican valores extremos, valores muy altos o incluso cero, a las variables las ecuaciones siguen teniendo sentido ya que el modelo no devuelve valores incoherentes.

- Tests o pruebas de consistencia

Prueba de validez facial: Podemos decir que la estructura del modelo se parece al sistema real que hemos modelado pues es una representación reconocible del sistema.

Prueba en parámetros de verificación: En este caso se trata de que existan equivalencias entre los parámetros, variables y sus valores numéricos del modelo con el sistema real. Para ello no disponemos de valores reales sino de hipótesis, pero sí que hemos sido capaces de utilizar parámetros y variables que se presentan en el sistema real de una cadena de suministro.

- Tests o pruebas de utilidad y efectividad

Idoneidad para los usuarios: Se ha comprobado si el presente modelo se considera con el tamaño, la complejidad y el nivel de detalle adecuados para las personas que supuestamente van a utilizar el modelo o, las encargadas de adoptar decisiones en la gestión de la cadena de suministro. Adicionalmente, se ha creado una interfaz de usuario para hacer el uso del modelo más fácil e intuitivo a cualquier usuario que carezca de conocimientos del modelo construido.

3. Validación del comportamiento del modelo

Tienen como objetivo establecer la confianza en el comportamiento que se obtiene al simular el modelo.

- Tests o pruebas de idoneidad

Prueba de sensibilidad en los parámetros: ¿Es el comportamiento del modelo sensible a las variaciones en valores de los parámetros característicos del sistema, es decir, las variables? Según se podrá apreciar en la simulación, se confirma el hecho de que al cambiar los valores de los parámetros se obtienen comportamientos diferentes pero a la vez con coherencia según los cambios que se han realizado.

- Tests o pruebas de consistencia

Los tests que aquí se recogen se basan en comparaciones con datos históricos del sistema real así como valores estadísticos de los cuales no se dispone. Por otra parte trata de evaluar la validez del modelo comparando con sucesos que ocurren en el sistema real. Al ser un prototipo, no se ha tenido la oportunidad de probarlo con situaciones reales de la cadena de producción y a su vez de la cadena de suministro.

- Tests o pruebas utilidad y efectividad

Comportamiento contraintuitivo: ¿Es el modelo capaz de generar nuevos puntos de vista o al menos la sensación de nuevos conocimientos, acerca de la naturaleza del problema abordado y el sistema dentro de ella surge? En el modelo presentado se puede responder afirmativamente, dado que aunque el objetivo principal es la obtención del 'Time to market', se puede apreciar dónde se producen los retrasos que hacen que el Time to market se salga de la fecha prevista. Por tanto, sí que se pueden extraer conocimientos del modelo con el objetivo de mejorar los procesos gestionados.

4. Validación de implicaciones políticas

Tienen como objetivo establecer la confianza en las políticas de decisión que se crean después de simular el modelo con diferentes escenarios y compararlo con lo que sucede en el sistema real. Estos tipos de tests son inviables en este caso dado que no hemos podido validar el modelo en ciertos términos anteriores por la falta de información. En el futuro si se construyera un modelo disponiendo de todos los

datos necesarios y habiendo validado previamente el modelo, sí que podríamos aplicar los test que se describen en esta etapa del esquema de validación.

En caso de haber dispuesto de mayor cantidad de datos reales podríamos haber aplicado el esquema de validación al completo y por tanto una vez hecho esto y habiendo superado todos los tests, el modelo estaría listo para ser utilizado en el entorno de producción para el cual ha sido construido y se dispondría de la posibilidad de simular escenarios para la creación de políticas de gestión en la cadena de suministro.

6.7 Presentación de la interfaz de usuario

6.7.1 La interfaz

Cualquier herramienta informática que se desarrolle debe contar con una interfaz más o menos intuitiva o visual con el fin de facilitar su uso a cualquier usuario con un mínimo de formación sobre el uso de la herramienta.

El objetivo por tanto, consiste en que cualquier persona con un mínimo de conocimiento de las variables características de la empresa para la que se construye el modelo y de los procesos que existen en ella, sea capaz de poder usar el modelo de simulación sin entender su estructura ni los diagramas que la definen.

Aunque el modelo construido es absolutamente funcional tal y como se presenta, ya que puede ser simulado y obtener los comportamientos definidos por las variables que se fijan, se ha querido construir la siguiente interfaz de usuario para hacer más intuitivo el uso de la herramienta que se presenta. En los sucesivos apartados se explica cada una de las partes que componen esta interfaz.

6.7.2 Parte general

Esta parte de la interfaz [Figura6.11] trata de recoger los parámetros característicos que resultan genéricos en el seno de la gestión de la cadena de suministro del centro de producción, así como el medidor de actuación o variable principal que deseamos conocer tal y como es ‘fecha de entrega de pedido terminado’ al cliente, o lo que es lo mismo, el ‘Time to market’.

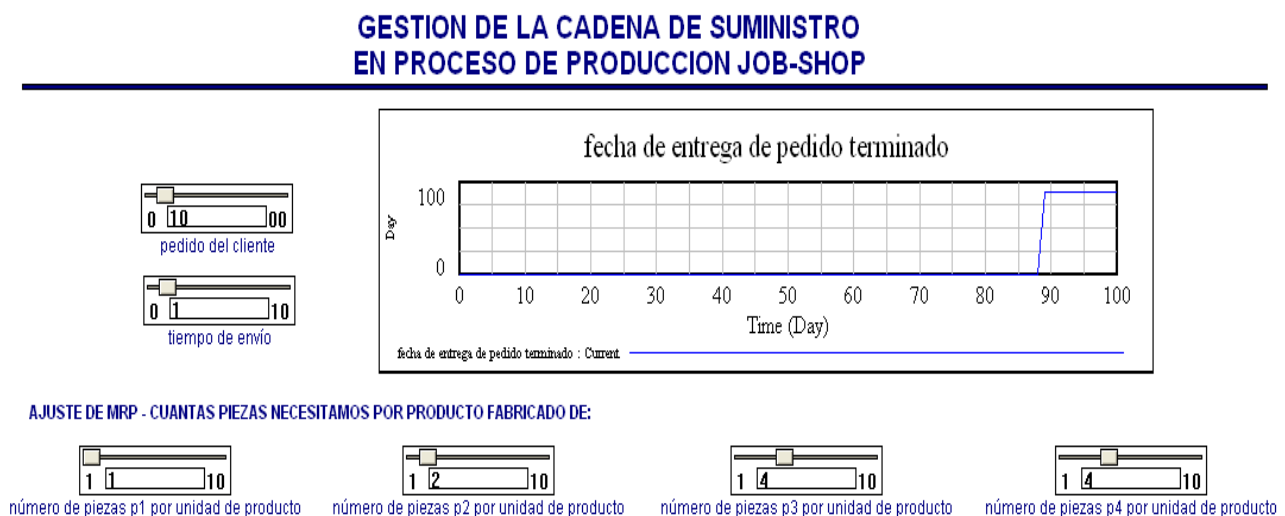


Figura 6.11 Parte general en la interfaz de usuario

Según se aprecia en la interfaz [Figura6.11], es posible actuar sobre las variables que se presentan, así como el tiempo que tarda el operador logístico en enviar la mercancía, moviendo los comandos deslizables. El software devuelve en tiempo real el valor de la fecha de entrega del pedido terminado a través de una gráfica que se representa en la interfaz.

En esta parte de la interfaz se pueden modificar las variables de la parte del modelo MRP así como de la parte de Plan de Producción.

6.7.3 Gestión del Almacén

A continuación se muestra la parte de la interfaz correspondiente a la gestión del almacén [Figura6.12]. En esta se puede actuar sobre las variables definidas en la parte del modelo correspondiente a Almacén, así como visualizar los flujos de stoks en cada uno de los procesos involucrados dentro del almacén como son la recepción y posterior almacenaje de las piezas.

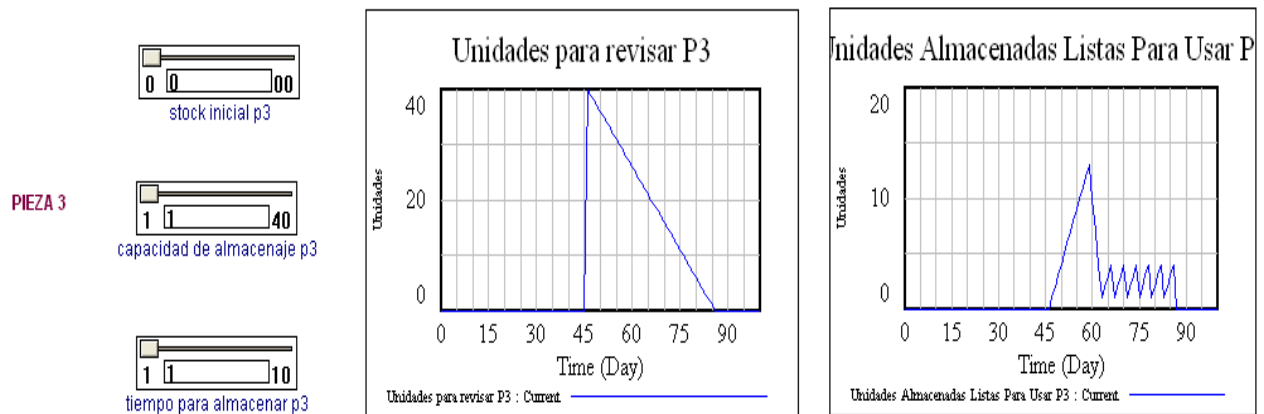


Figura 6.12 Gestión del Almacén en la interfaz de usuario

En este caso se presenta la interfaz correspondiente a las gestiones que se deben realizar para la pieza 3 [Figura6.12]. Existe una interfaz igual a la mostrada por cada una de las piezas que se usan en la fabricación del producto final, es decir donde pone un 3 habría que sustituirlo por un 1, 2 ó 4 según el caso, en total cuatro zonas de Almacén.

6.7.4 Compras

Se presenta ahora la parte de la interfaz correspondiente a la gestión que realiza el departamento de compras [Figura6.13]. Estas son las variables que se definen para compras y representan los posibles retrasos que se pueden producir a la hora de realizar los pedidos de acad una de los tipos de piezas necesarios.

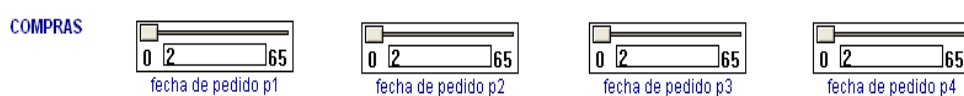


Figura 6.13 Compras en la interfaz de usuario

La cantidad de piezas que son necesarias pedir serán calculadas automáticamente por el modelo utilizando la información que se obtiene del MRP y del stock que existe en el Almacén, por tanto no resulta necesario considerarlo como una variable del departamento de Compras.

6.7.5 Gestión de la Producción

Esta parte de la interfaz [Figura6.14], representa cada uno de los procesos que intervienen en la fabricación del producto final dentro de la cadena de producción. Se puede observar mediante las gráficas los diferentes niveles de stocks de producto intermedio, así como identificar qué impactos se producen en la producción y que pueden generar cuellos de botella.

GESTION DE LA PRODUCCIÓN

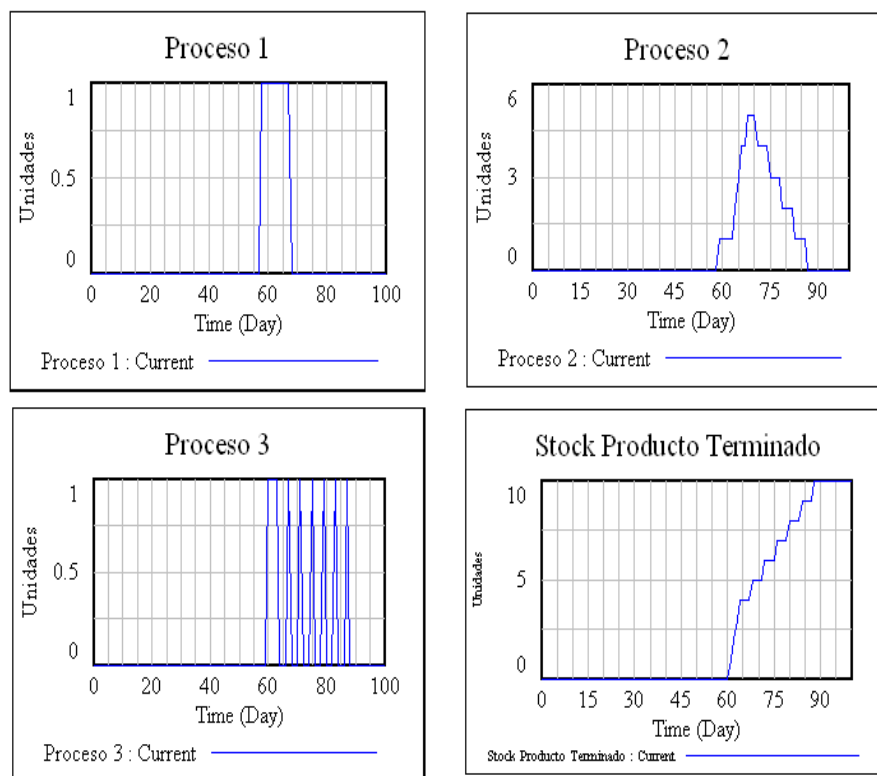


Figura 6.14 Gestión de la Producción en la interfaz de usuario

También es posible actuar sobre la variable ‘capacidad de preparación de piezas por día, que define la cadencia de fabricación inicial y es una medida de productividad para comenzar el proceso de producción.

6.7.6 Gestión de Proveedores

En esta parte de la interfaz [Figura6.15] se puede actuar sobre las variables características definidas para los proveedores y ver como afectan éstas a los procesos propios del proveedor y a los procesos que se desarrollan en el seno del centro de producción gestionado, posibilitando así intercambiar información con los proveedores para evitar que retrasos en sus procesos o falta de productividad afecten a los procesos de producción. Además, es posible observar los niveles de Stock de producto intermedio en cada uno de los procesos del proveedor en cuestión e identificar cuellos de botella.

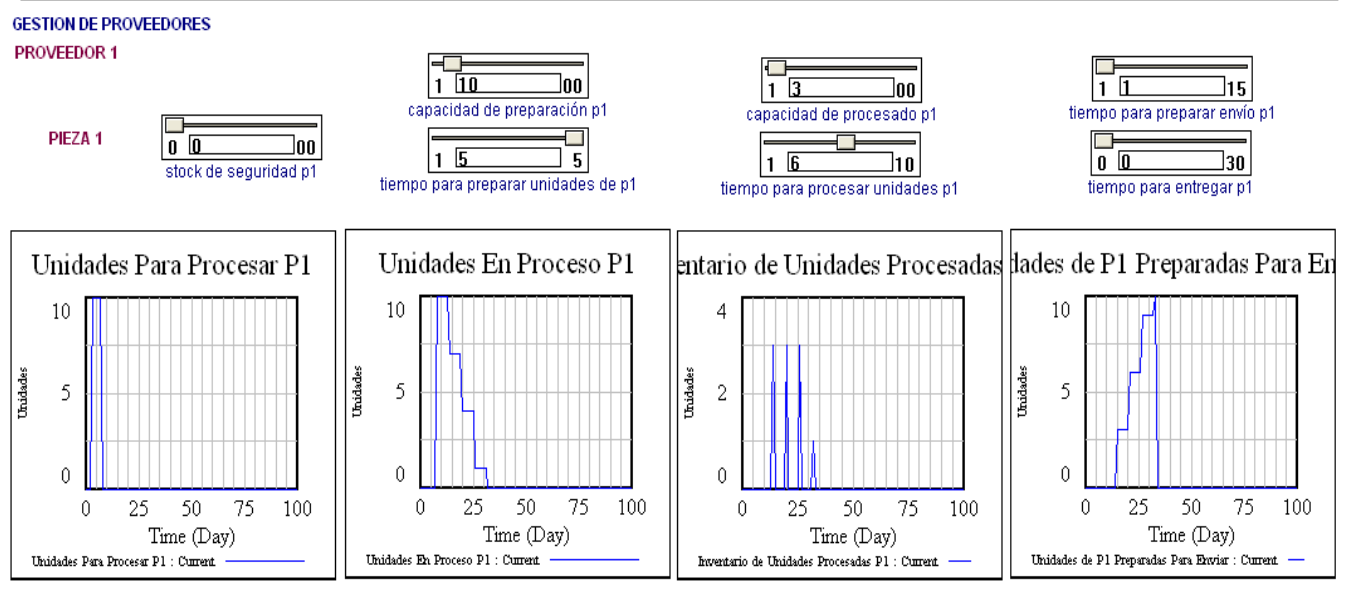


Figura 6.15 Gestión de Proveedores en la interfaz de usuario

En este caso se presenta la interfaz correspondiente a las gestiones que se deben realizar para la pieza 1 [Figura6.15]. Existe una interfaz igual a la mostrada por cada una de las piezas que se usan en la fabricación del producto final, es decir donde pone un 1

habría que sustituirlo por un 2, 3 o 4 según el caso. En total existen cuatro procesos, uno por pieza, pero solo tres proveedores, la pieza 2 y 3 la suministra el Proveedor 2.

6.8 Simulando el modelo. Escenarios

6.8.1 Introducción

Una vez que tenemos el modelo construido y validado, se han construido diferentes escenarios actuando sobre los valores de cada una de las variables características del sistema. A continuación analizaremos los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones, para después poder desarrollar unas políticas para la toma de decisiones en la gestión de la cadena de suministro que hemos modelado. Así como para entender el funcionamiento del modelo y ver las no linealidades que existen en la gestión de sistemas complejos.

6.8.2 Escenario 1

A continuación se presenta el primer escenario simulado con el modelo construido. El Escenario 1 representa la situación que se daría en condiciones normales en la cadena de suministro modelada además de considerarse aquí como la situación de partida para posteriormente ir observando los cambios que se producen en el sistema.

6.8.2.1 Parámetros iniciales Escenario 1

En la siguiente tabla [Tabla6.8] se muestran los valores que han recibido cada una de las variables características del sistema para realizar la simulación del Escenario 1. Suponemos que estos son los valores de los parámetros que se dan en condiciones normales en la cadena de suministro que se ha modelado.

Plan de Producción	Valor	Unidades
<i>Pedido del cliente</i>	10	Day

MRP	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Numero de piezas px por unidad de producto</i>	1	2	4	4	Dmnl

Compras	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Fecha de pedido px</i>	2	2	2	2	Day

Proveedor 1, 2 o 3	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Capacidad de preparación px</i>	5	1	7	10	Unidades/Day
<i>Tiempo para preparar unidades px</i>	5	5	4	1	Day
<i>Capacidad de procesado px</i>	40	10	10	10	Unidades/Day
<i>Tiempo para procesar unidades px</i>	5	5	4	1	Day
<i>Tiempo para preparar envío px</i>	2	1	1	1	Day
<i>Stock de seguridad px</i>	0	4	0	60	Unidades
<i>Tiempo para entregar px</i>	10	1	1	1	Day

Almacén	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Stock inicial px</i>	0	5	0	0	Unidades
<i>Capacidad de almacenaje px</i>	2	1	4	1	Unidades/Day
<i>Tiempo para almacenar px</i>	5	1	6	2	Day

Cadena de Producción	Valor	Unidades
<i>Capacidad de preparación de piezas por día</i>	10	Unidades
<i>Tiempo de envío</i>	2	Day

Tabla 6.8 Valores utilizados para el Escenario 1

6.8.2.2 Resultados del Escenario 1

De esta primera simulación, denominada con el nombre de Escenario 1, podemos obtener el valor del medidor de actuación para la gestión de la cadena de suministro considerado como 'Fecha de entrega de pedido terminado' o 'Time to market'

[Tabla6.9], extraído de la gráfica que devuelve la interfaz de usuario del modelo [Figura6.16].

Plan de Producción	Valor	Unidades
Fecha de entrega de pedido terminado	98	Day

Tabla 6.9 Valor del medidor de Actuación Escenario 1

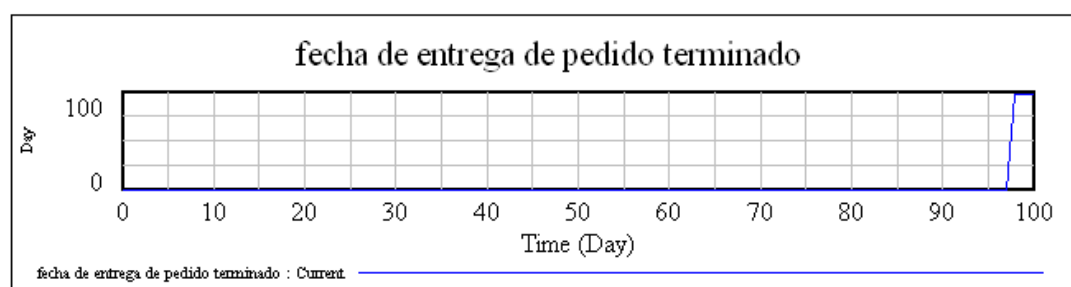



Figura 6.16 Fecha de entrega de pedido terminado Escenario 1

Se puede obtener el valor numérico utilizando una herramienta que posee el software de simulación Vensim. Esta herramienta, llamada Table, se representa con el siguiente símbolo [Figura6.17] y permite la obtención de todos los valores numéricos de una variable en cada instante de tiempo.



Time (Day)	96	97	98	99	100
"fecha de entrega de pedido terminado" Runs:		Current			
fecha de entrega de pedido terminado	0	0	98	98	98

Figura 6.17 Herramienta Table

Esto es aplicable a cualquier otra variable que deseemos conocer su valor. A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos que resultan más significativos para el Escenario 1, según los valores introducidos para las variables características. Por lo general se van a mostrar las gráficas que representan la evolución de las diferentes variables para lograr una visión más intuitiva del comportamiento de la cadena de suministro modelada. Se puede consultar el valor numérico de alguna variable que nos interese en cualquier momento pero tal y como se explicó, el objetivo es conseguir reducir el 'Time to market' y por tanto es el principal valor numérico que desearemos conocer.

Los resultados obtenidos para la cadena de producción son los siguientes [Figura6.18]:

GESTION DE LA PRODUCCIÓN

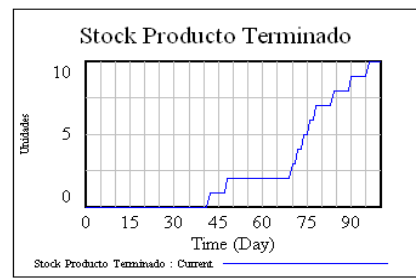
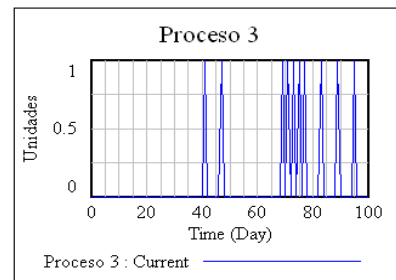
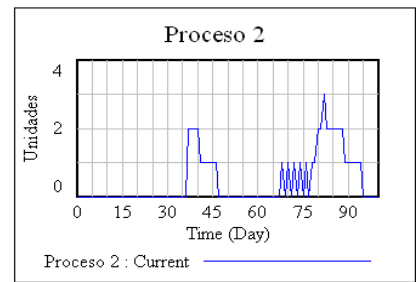
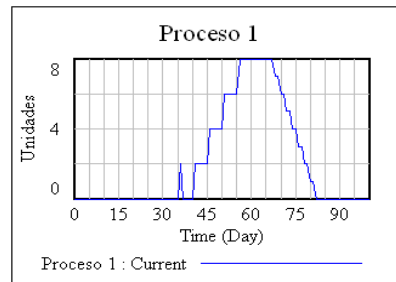
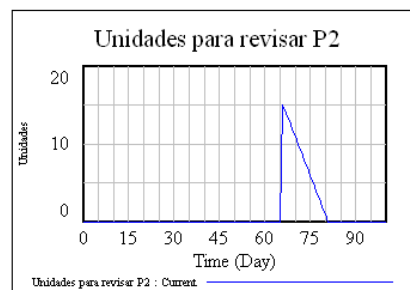
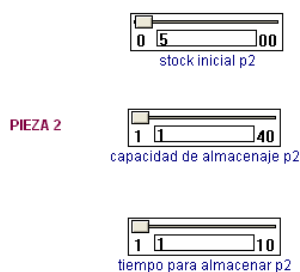
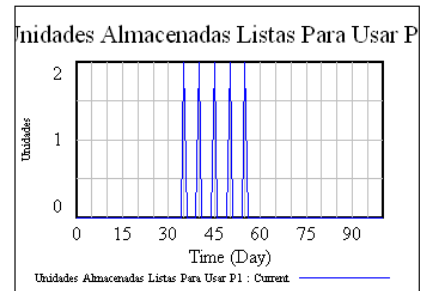
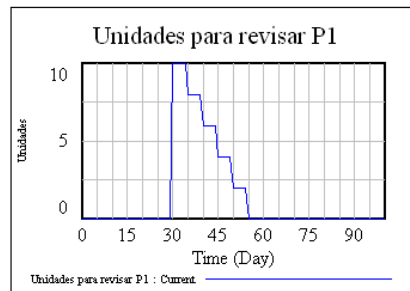
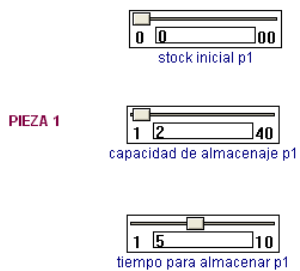


Figura 6.18 Resultados Cadena de Producción Escenario 1

Los resultados obtenidos para el Almacén son los siguientes [Figura6.19]:

GESTION DEL ALMACEN



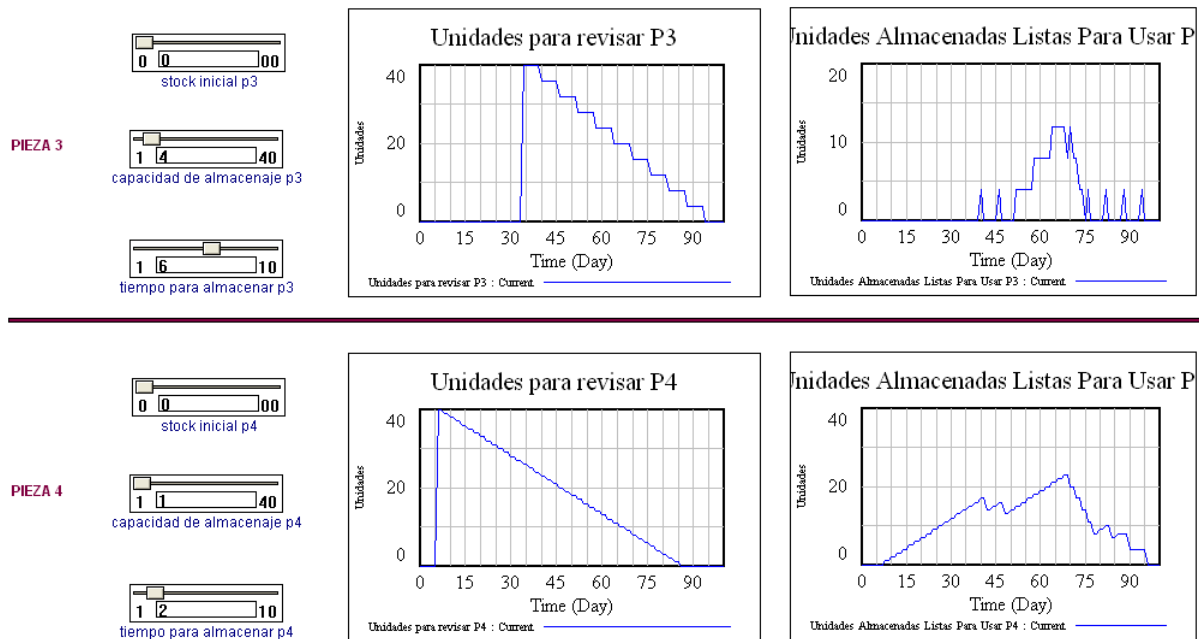


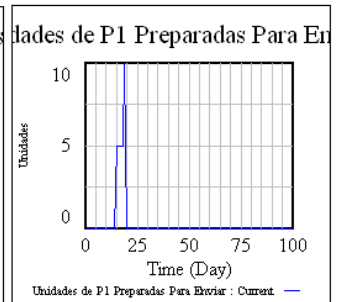
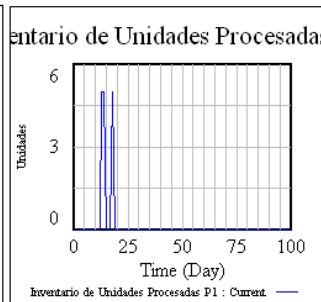
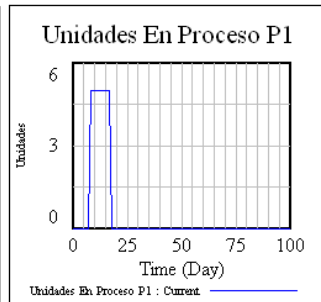
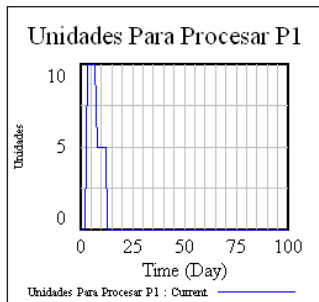
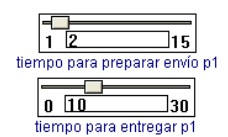
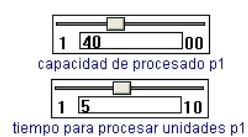
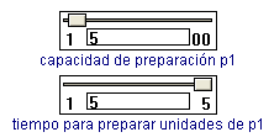
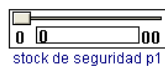
Figura 6.19 Resultados de Almacén Escenario 1

Los resultados obtenidos para los Proveedores son los siguientes [Figura6.20]:

GESTION DE PROVEEDORES

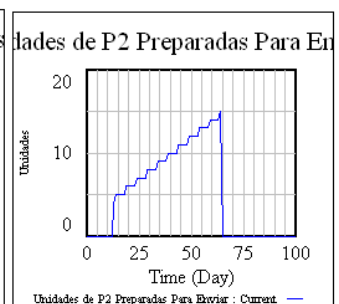
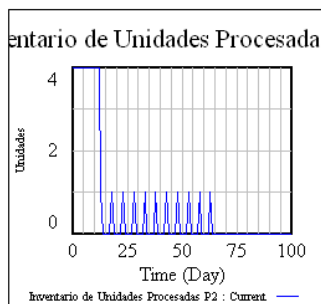
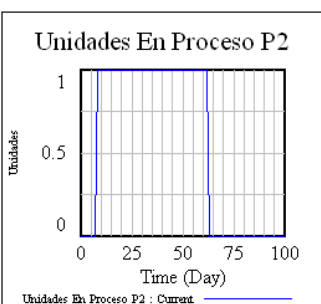
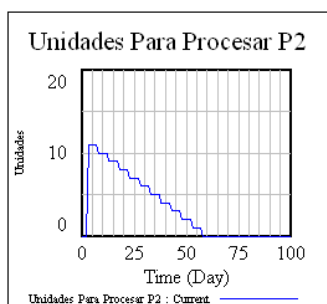
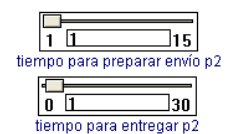
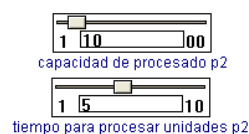
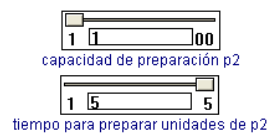
PROVEEDOR 1

PIEZA 1



PROVEEDOR 2

PIEZA 2



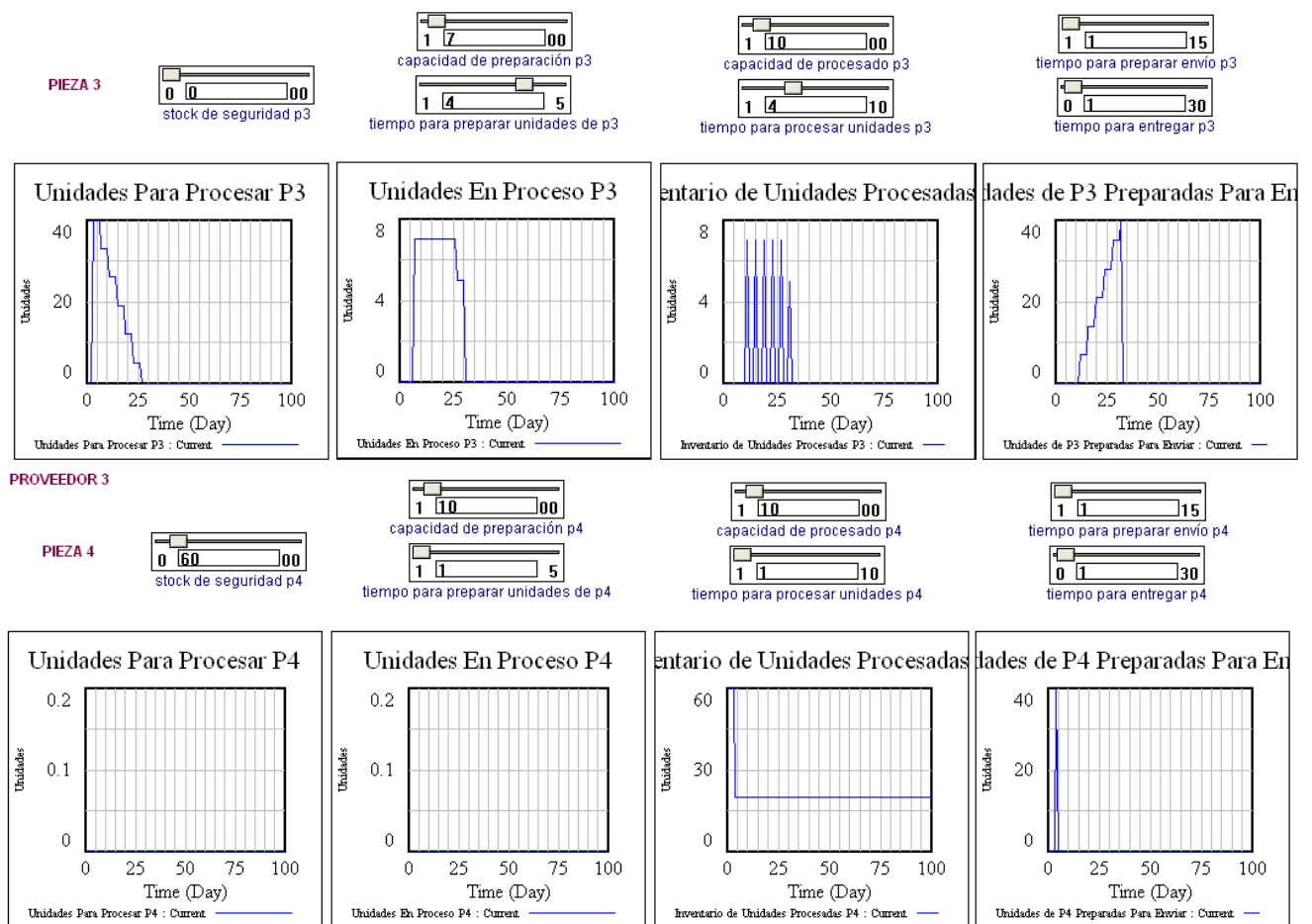


Figura 6.20 Resultados de Proveedores Escenario 1

6.8.2.3 Comentarios del Escenario 1

Como se ha podido observar en los resultados del Escenario 1, el ‘Time to market’ resulta ser 98 días [Tabla6.9]. Esto quiere decir que desde que el cliente realiza el pedido de los productos hasta que éstos llegan terminados a sus instalaciones transcurren 98 días. Según las condiciones que hemos fijado, variables y parámetros de actuación de todos los elementos que integran la cadena de suministro.

Referente a los resultados de la cadena de producción [Figura6.18] se pueden observar intervalos en los que no se está produciendo y por tanto existen operarios que están ociosos. Esto se debe a los retrasos que se producen en los Proveedores y en el Almacén lo que suponen cuellos de botella en la cadena de suministro. Se puede apreciar en ‘Stock de producto Terminado’ ciertas partes planas de la gráfica. Estas

partes representan periodos de tiempo en los que no se incrementa el Stock y por tanto supone que se está esperando material en alguno de los procesos. En concreto, entre el día 47 y el día 69 es cuando existe un parón en la producción más acrecentado. Esto se debe principalmente a que el proveedor de la pieza 2 tiene un gran retraso a la hora de entregar la mercancía. La producción no se ve retrasada todavía más gracias a la existencia de 5 unidades de p2 en el stock inicial del Almacén [Figura6.19].

Podemos apreciar la gran influencia de los cuellos de botella en la cadena de suministro. Como hemos comentado, el Proveedor de la pieza 2 [Figura6.20] es el elemento que debemos corregir pues nos está limitando la producción y generando tiempos improductivos. De nada sirve tener unos proveedores que sirvan con extremada rapidez como es el caso del proveedor de la pieza 4, el cual siempre tiene gran cantidad de piezas en stock, si los proveedores que surten de piezas para procesos anteriores se retrasan. Además, esto hace que estemos utilizando el almacén más tiempo del que se debería para la pieza 4 suponiendo costes de almacenaje y manipulación. Esto último se aprecia también con la pieza 3 [Figura6.19], en el periodo de tiempo improductivo de la cadena de producción se van acumulando las ‘Unidades almacenadas listas para usar p3’ ya que no pueden ser utilizadas porque la pieza 2 no ha sido instalada aún.

6.8.3 Análisis de sensibilidad en el Escenario 1

A continuación se va presentar un análisis de sensibilidad al cual se ha sometido el modelo construido y en particular aplicado al Escenario 1. El objetivo es obtener una visión más intuitiva sobre los impactos que se producen en el sistema por el hecho de modificar ciertas variables características de la cadena de suministro. Este ejercicio aplicado a un sistema real puede servir para la evaluación de ciertas variables que se pueden modificar traduciendo estos cambios en mejoras de los procesos del centro de producción.

6.8.3.1 Variables de actuación directa

Para la construcción del análisis de sensibilidad es necesario seleccionar las variables de actuación directa, o lo que es lo mismo, las variables de la cadena de suministro sobre las que un gestor del centro de producción puede actuar sin tener que tener en cuenta elementos como clientes o proveedores.

Las variables de actuación directa en la cadena de suministro son las siguientes [Tabla6.10]. Estas se muestran con los valores por defecto en el Escenario 1.

Compras	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Fecha de pedido px</i>	2	2	2	2	Day

Almacén	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Stock inicial px</i>	0	5	0	0	Unidades
<i>Capacidad de almacenaje px</i>	2	1	4	1	Unidades/Day
<i>Tiempo para almacenar px</i>	5	1	6	2	Day

<i>Tiempo para almacenar px</i>	Valor	Unidades
<i>Capacidad de preparación de piezas por día</i>	10	Unidades

Tabla 6.10 Variables de actuación directa

Una vez identificadas las variables, para construir el análisis de sensibilidad, vamos a seleccionar dos de entre todas las anteriores [Tabla6.11] con el objetivo de hacer más ligera la presentación de los resultados. En cada una de las variables existe un rango entre el cual puede oscilar su valor, veremos qué impactos produce esto en el sistema.

Variables de actuación directa	Rango px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Capacidad de almacenaje px</i>	1-10	1-10	1-10	1-10	Unidades/Day
<i>Tiempo para almacenar px</i>	1-10	1-10	1-10	1-10	Day

Tabla 6.11 Variables de actuación directa seleccionadas

6.8.3.2 Resultados del análisis de sensibilidad

Cambiando los valores de las variables seleccionadas en el apartado anterior de manera independiente se han obtenido los siguientes resultados para el 'Time to market':

Capacidad de almacenaje p1	Time to market
1	97
2	97
4	97
5	97
6	97
8	97
10	97

Tabla 6.12 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p1

Tiempo para almacenar p1	Time to market
1	97
2	97
4	97
5	97
6	97
8	97
10	97

Tabla 6.13 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p1

Capacidad de almacenaje p2	Time to market
1	97
2	97
4	97
5	97
6	97
8	97
10	97

Tabla 6.14 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p2

Tiempo para almacenar p2	Time to market
1	97
2	100
4	>100
5	>100
6	>100
8	>100
10	>100

Tabla 6.15 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p2

Capacidad de almacenaje p3	Time to market
1	>100
2	>100
4	97
5	88
6	88
8	88
10	88

Tabla 6.16 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p3

Tiempo para almacenar p3	Time to market
1	88
2	88
4	88
5	88
6	97
8	>100
10	>100

Tabla 6.17 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p3

Capacidad de almacenaje p4	Time to market
1	97
2	97
4	97
5	97
6	97
8	97
10	97

Tabla 6.18 Variables de actuación directa Capacidad de almacenaje p4

Tiempo para almacenar p4	Time to market
1	97
2	97
4	>100
5	>100
6	>100
8	>100
10	>100

Tabla 6.19 Variables de actuación directa Tiempo para almacenar p4

En base a los resultados obtenidos se puede entender que existen variables que aunque puedan ser modificadas, con el supuesto objetivo de mejorar los procesos de la empresa, no tienen un impacto sobre el time to market que es lo que queremos reducir.

Si un gestor de la cadena de suministro utilizase el presente modelo para concentrar sus esfuerzos hacia una de las variables, podría ser capaz de identificar cuáles son las variables que poseen mayor impacto [Tabla6.20].

Variables de actuación directa
<i>Tiempo para almacenar p2</i>
<i>Capacidad de almacenaje p3</i>
<i>Tiempo para almacenar p3</i>
<i>Tiempo para almacenar p4</i>

Tabla 6.20 Variables de actuación directa con mayor impacto

En este caso, para que el gestor pueda hacer efectivas las mejoras que representan los cambios en las variables, habría que contratar más mano de obra para mejorar la capacidad de almacenaje para la pieza 3 ó el tiempo para almacenar la pieza 2, 3 ó 4. Se demuestra que no siempre una mayor capacidad en un proceso resulta mejor, pues existen interferencias con otros elementos del sistema. Estas interferencias se aprecian cuando a pesar de modificar la variable seleccionada no se producen cambios en el 'Time to market'.

6.8.3.3 No linealidad en el sistema

Para demostrar las interferencias que existen entre los diferentes elementos del sistema, vamos a simular el modelo con una combinación al azar dentro del rango de valores descritos para las variables de actuación directa seleccionadas. Para ello utilizaremos los siguientes valores [Tabla6.21].

Variables de actuación directa	Rango px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Capacidad de almacenaje px</i>	2	6	5	8	Unidades/Day
<i>Tiempo para almacenar px</i>	2	1	1	1	Day

Tabla 6.21 Variables de actuación directa con valores modificados

El resultado que devuelve la simulación para el time to market es el siguiente [Tabla6.22].

Plan de Producción	Valor	Unidades
<i>Fecha de entrega de pedido terminado</i>	73	Day

Tabla 6.22 Valor del Time to market

Vemos que de esta manera se aprecia un valor mucho más reducido para el Time to market, 73 días. Para lograrlo se han tenido que modificar todas las variables de actuación directa combinadas entre sí, lo cual demuestra cierta interacción entre estas variables. A pesar de ello, estas mejoras introducidas implican haber realizado una inversión económica mayor que si sólo se hubiese modificado una variable y por tanto habría que valorar si esto resulta económicamente viable.

6.8.4 Escenario 2

A continuación se presenta el Escenario 2 que resulta ser una simulación realizada de la misma manera que se ha explicado en el análisis de sensibilidad, modificando variables de actuación directa, solo que en este caso, se pretenden realizar cambios en ciertas variables con el objetivo de evaluar el sistema en su totalidad. Además, de esta manera se pueden apreciar los impactos que tendrán estos cambios en el resto de elementos de la cadena de suministro.

6.8.4.1 Parámetros iniciales Escenario 2

En la siguiente tabla [Tabla6.23] se muestran los valores que han recibido cada una de las variables características del sistema para realizar la simulación. En negrita aparecen los tres valores que se modifican respecto al Escenario 1.

Plan de Producción	Valor	Unidades
<i>Pedido del cliente</i>	10	Day

MRP	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Numero de piezas px por unidad de producto</i>	1	2	4	4	Dmnl

Compras	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
Fecha de pedido px	2	2	2	2	Day

Proveedor 1, 2 o 3	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
Capacidad de preparación px	5	1	7	10	Unidades/Day
Tiempo para preparar unidades px	5	5	4	1	Day
Capacidad de procesado px	40	10	10	10	Unidades/Day
Tiempo para procesar unidades px	5	5	4	1	Day
Tiempo para preparar envío px	2	1	1	1	Day
Stock de seguridad px	0	4	0	60	Unidades
Tiempo para entregar px	10	1	1	1	Day

Almacén	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
Stock inicial px	0	20	0	0	Unidades
Capacidad de almacenaje px	2	1	4	2	Unidades/Day
Tiempo para almacenar px	5	1	4	2	Day

Cadena de Producción		Valor	Unidades
Capacidad de preparación de piezas por día		10	Unidades
Tiempo de envío		2	Day

Tabla 6.23 Valores utilizados para el Escenario 2

6.8.4.2 Resultados del Escenario 2

Del Escenario 2, podemos obtener el valor del medidor de actuación para la gestión de la cadena de suministro considerado como 'Fecha de entrega de pedido terminado' [Tabla6.24].

Plan de Producción	Valor	Unidades
Fecha de entrega de pedido terminado	78	Day

Tabla 6.24 Valor del medidor de Actuación Escenario 2

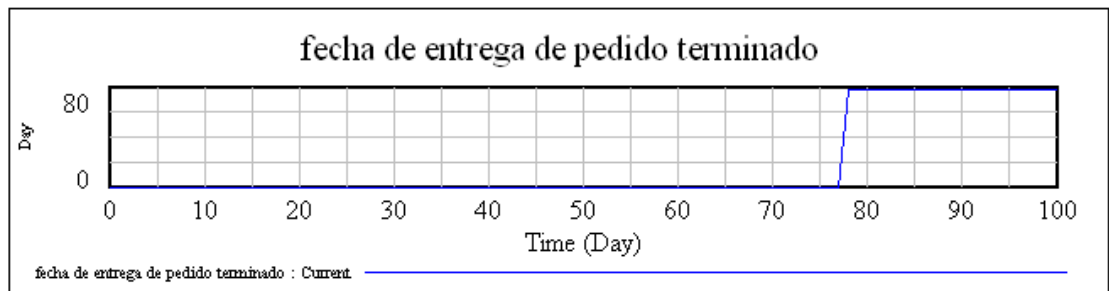


Figura 6.21 Fecha de entrega de pedido terminado Escenario 2

Los resultados obtenidos para la Cadena de Producción son los siguientes [Figura6.22]:

GESTION DE LA PRODUCCIÓN

capacidad de preparación de piezas por día

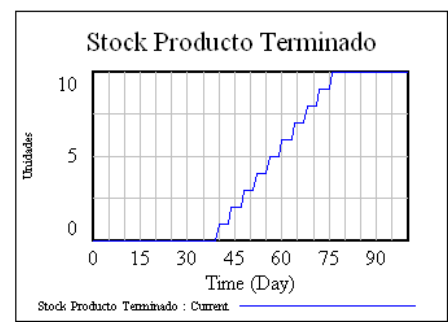
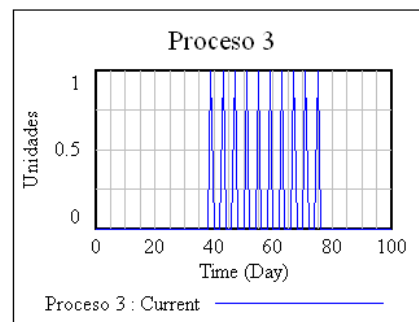
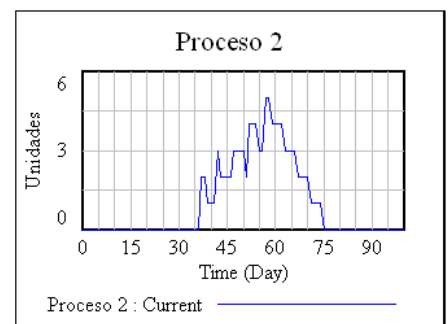
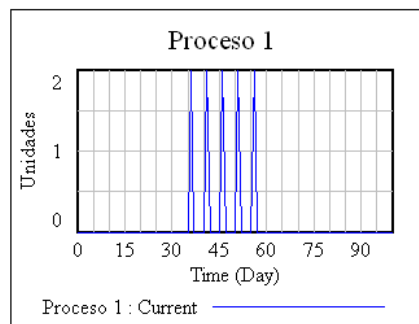


Figura 6.22 Resultados Cadena de Producción Escenario 2

Los resultados obtenidos para el Almacén son los siguientes [Figura6.23]:

GESTION DEL ALMACEN

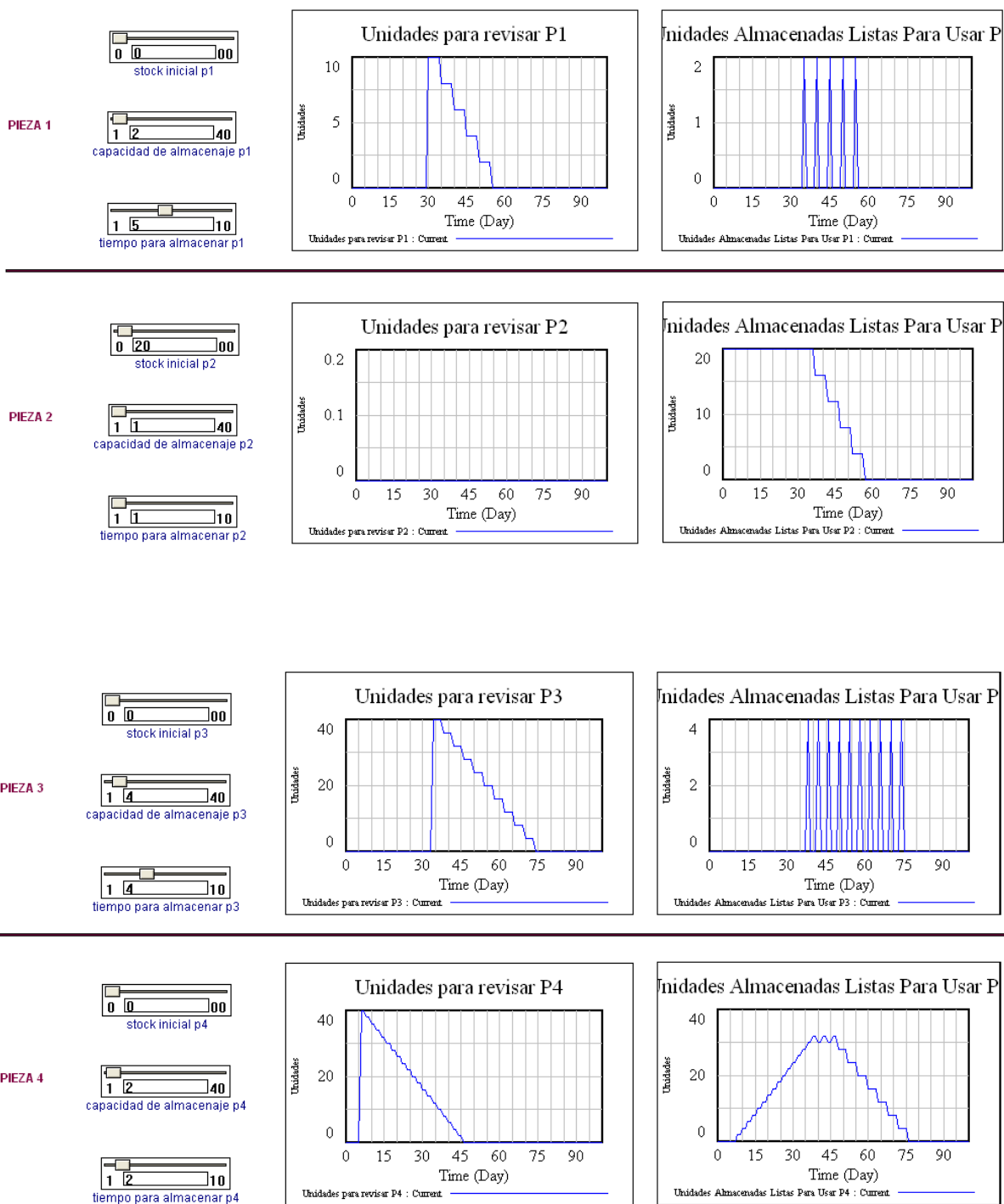


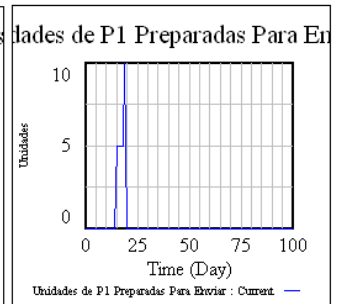
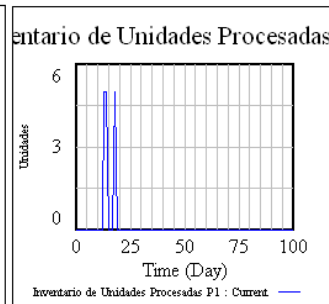
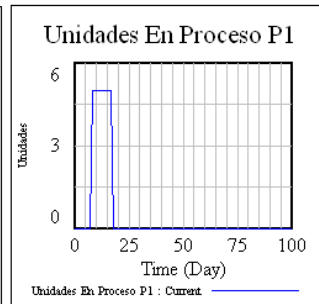
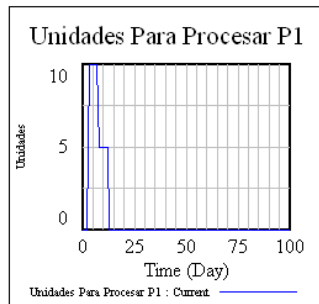
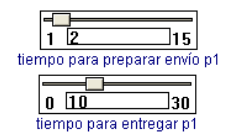
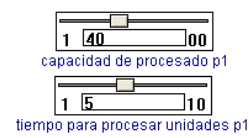
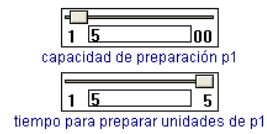
Figura 6.23 Resultados de Almacén Escenario 2

Los resultados obtenidos para los Proveedores son los siguientes [Figura6.24]:

GESTION DE PROVEEDORES

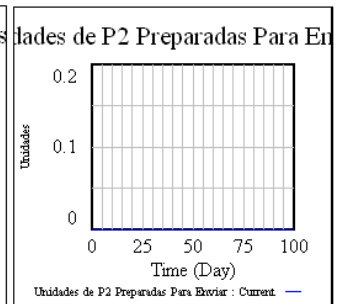
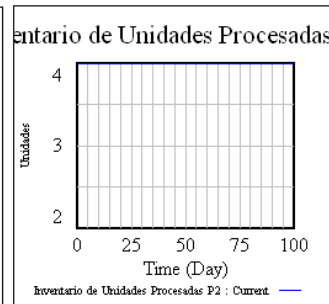
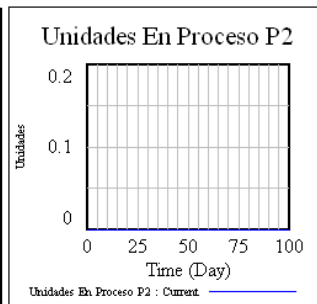
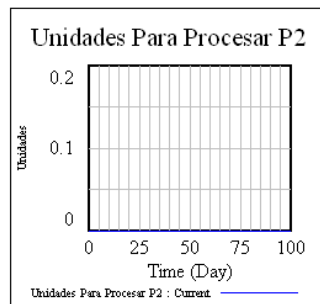
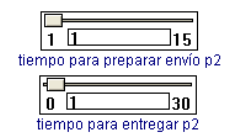
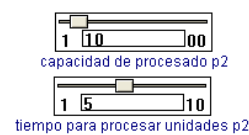
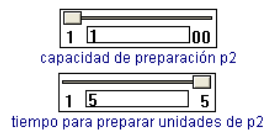
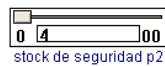
PROVEEDOR 1

PIEZA 1

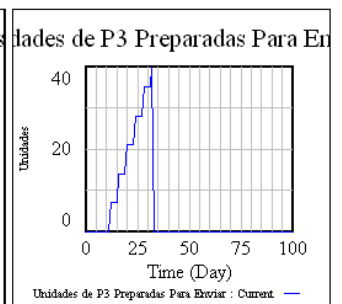
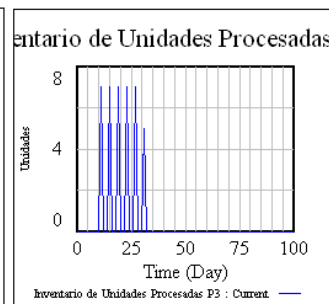
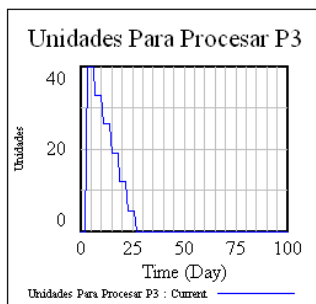
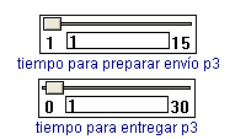
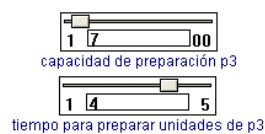
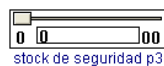


PROVEEDOR 2

PIEZA 2



PIEZA 3



PROVEEDOR 3

PIEZA 4

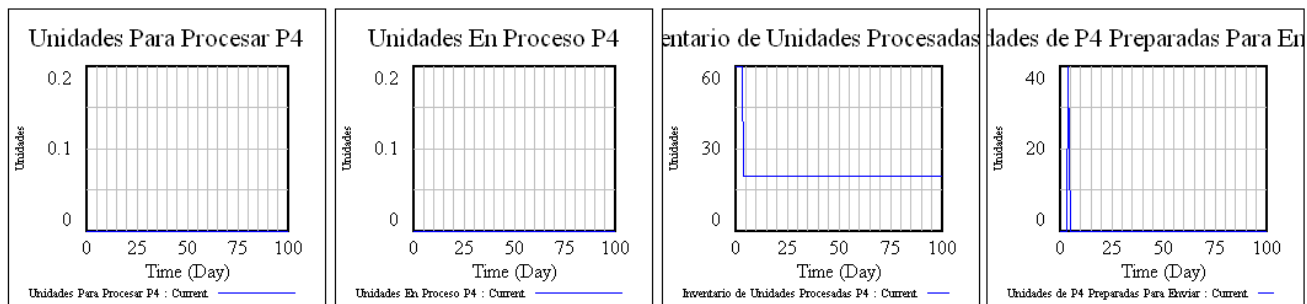
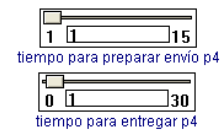
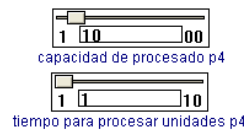
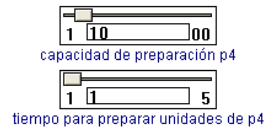
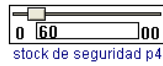


Figura 6.24 Resultados de Proveedores Escenario 2

6.8.4.3 Comentarios del Escenario 2

En la simulación del Escenario 2 se han modificado los valores de los parámetros introducidos definidos anteriormente [Tabla6.23]. Como vimos en el Escenario 1 existían cuellos de botella producidos por retrasos en los Proveedores y en el Almacén. En concreto la pieza que más retrasaba la producción era la número 2 por tanto se ha simulado qué pasaría si se adoptan ciertas medidas correctoras en la cadena de suministro, estas se explican a continuación.

Para empezar se aprecia que el ‘Time to market’ ó ‘Fecha de entrega de pedido terminado’ se ha reducido en 20 días respecto al Escenario 1, pasando de 98 días a 78 días [Tabla6.24]. Por tanto, si adoptamos estas medidas correctivas es evidente que mejoraremos el plazo de entrega. Pero debemos evaluar qué cambios hemos realizado y si la implantación de éstos merece la pena.

Todo cambio o mejora supone una inversión. Por tanto, debemos ver si el coste de las mejoras resulta adecuado para el beneficio que se va a obtener. En este caso hemos considerado tener un stock inicial mayor de piezas p2 en el Almacén, pasando de las 5 que había en condiciones normales a 20, con el objetivo de suplir la falta de productividad del Proveedor 2 que se apreciaba en el Escenario 1.

Adicionalmente, se ha valorado la posibilidad de mejorar la productividad de las operaciones que se realizan en el Almacén. Esto podría ser posible pues depende exclusivamente del centro de producción. En este caso hemos reducido el 'Tiempo para almacenar p3' de 6 a 4 días y por otro lado hemos incrementado la 'capacidad de almacenaje p4' de 1 a 2 unidades al día. Esto se implantaría con la introducción de más recursos humanos asociados al Almacén. Por tanto al final supondría incrementar los costes del proceso de producción y por ende el del producto final.

Referente a los resultados de la cadena de producción [Figura6.22], se puede observar que ya no existen periodos tan largos de tiempo improductivo, sino que la producción sigue una cadencia sostenida en la cual el flujo de piezas necesarias en cada proceso va llegando prácticamente en el tiempo requerido, lo que hace que el plazo de entrega se reduzca. Aun así se aprecia una acumulación de producto intermedio en el Proceso 2 considerada como cola de producción, esto quiere decir que no es lo suficientemente eficiente nuestro proceso de producción todavía.

Vemos que el Escenario 2 es mejor que el Escenario 1, pero a costa de tener que realizar una inversión económica que a simple vista no se puede saber si resulta rentable. En estos casos, lo adecuado es intentar que el proveedor también ponga de su parte, compartiendo los costes de las mejoras. Por ejemplo que el centro de producción mejore su productividad en el almacén y que el proveedor mejore su productividad en ciertos procesos producción para evitar que se retrase la fabricación de los productos. También se puede negociar que parte, o todo el stock inicial que debería tener el centro de producción en su Almacén, lo tenga el proveedor en sus instalaciones como un stock de seguridad.

6.8.5 Escenario 3

A continuación se presenta el tercer y último escenario simulado con el modelo construido. Se trata de obtener un resultado que evalúe los impactos que se producen en el sistema si ahora tenemos en cuenta que se puede actuar sobre variables que antes

no se podía. Como se ha explicado en el Escenario 2, el hecho de acordar ciertas medidas con otros elementos de la cadena de suministro, como pueden ser los proveedores, hace que se puedan obtener mejores resultados como veremos en el Escenario 3.

6.8.5.1 Parámetros iniciales Escenario 3

En la siguiente tabla [Tabla6.25] se muestran los valores que han recibido cada una de las variables características del sistema para realizar la simulación. En negrita aparecen los seis valores que se modifican respecto al Escenario 1.

Plan de Producción	Valor	Unidades
Pedido del cliente	10	Day

MRP	P1	P2	P3	P4	Unidades
Numero de piezas px por unidad de producto	1	2	4	4	Dmnl

Compras	P1	P2	P3	P4	Unidades
Fecha de pedido px	2	2	2	2	Day

Proveedor 1, 2 o 3	P1	P2	P3	P4	Unidades
Capacidad de preparación px	5	1	10	10	Unidades/Day
Tiempo para preparar unidades px	5	5	3	1	Day
Capacidad de procesado px	40	10	10	10	Unidades/Day
Tiempo para procesar unidades px	5	5	1	1	Day
Tiempo para preparar envío px	2	1	1	1	Day
Stock de seguridad px	0	10	0	60	Unidades
Tiempo para entregar px	10	1	1	1	Day

Almacén	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
Stock inicial px	0	10	0	0	Unidades
Capacidad de almacenaje px	2	1	4	2	Unidades/Day
Tiempo para almacenar px	5	1	5	2	Day

Cadena de Producción	Valor	Unidades
Capacidad de preparación de piezas por día	10	Unidades
Tiempo de envío	2	Day

Tabla 6.25 Valores utilizados para el Escenario 3

6.8.5.2 Resultados del Escenario 3

Del Escenario 3, podemos obtener el valor del medidor de actuación para la gestión de la cadena de suministro considerado como 'Fecha de entrega de pedido terminado' [Tabla6.26].

Plan de Producción	Valor	Unidades
Fecha de entrega de pedido terminado	73	Day

Tabla 6.26 Valor del medidor de Actuación Escenario 3

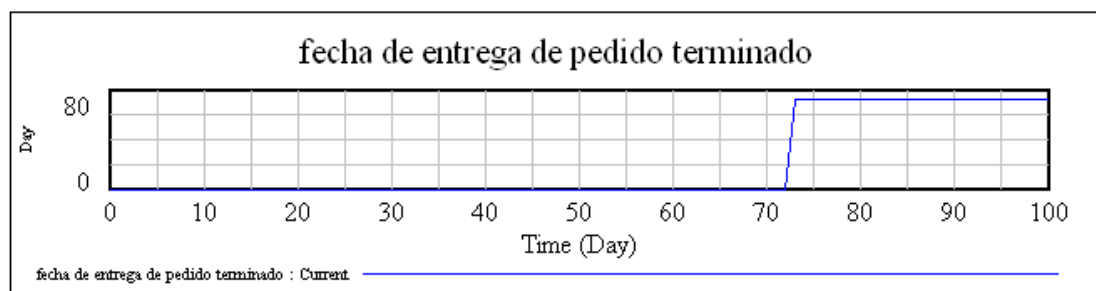


Figura 6.25 Fecha de entrega de pedido terminado Escenario 3

Los resultados obtenidos para la Cadena de Producción son los siguientes [Figura6.26]:

GESTION DE LA PRODUCCIÓN

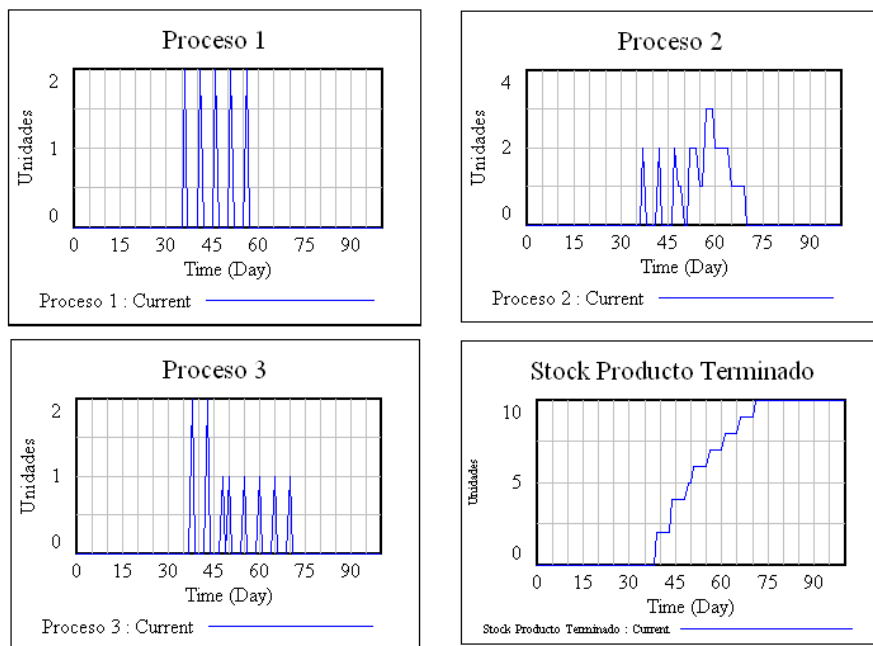
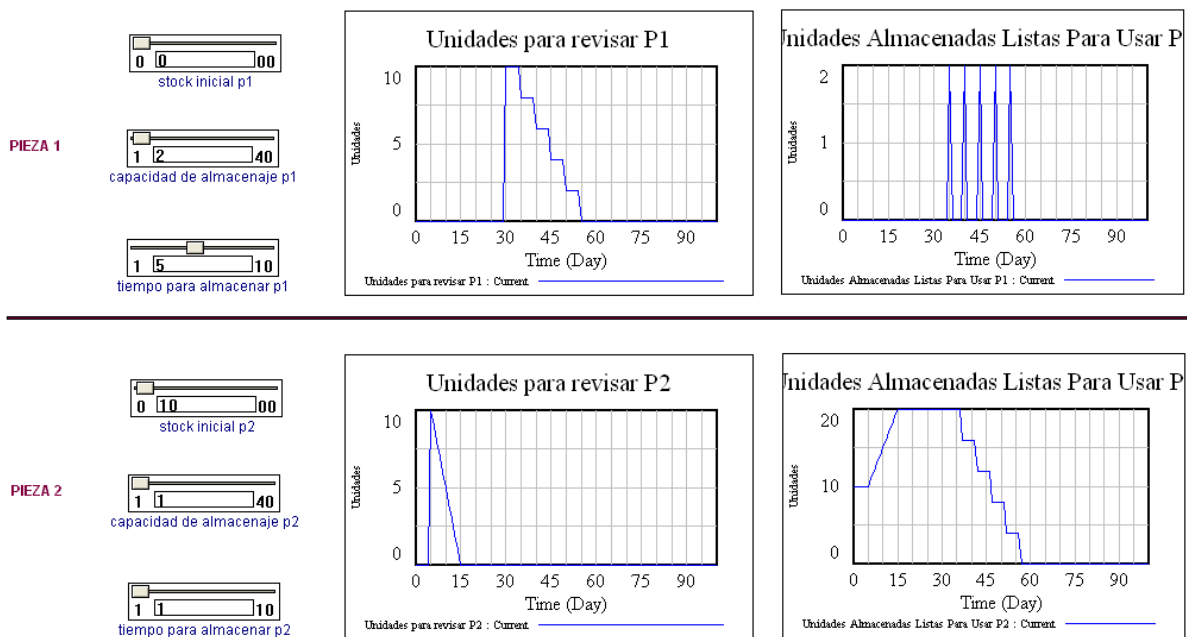


Figura 6.26 Resultados Cadena de Producción Escenario 3

Los resultados obtenidos para el Almacén son los siguientes [Figura6.27]:

GESTION DEL ALMACEN



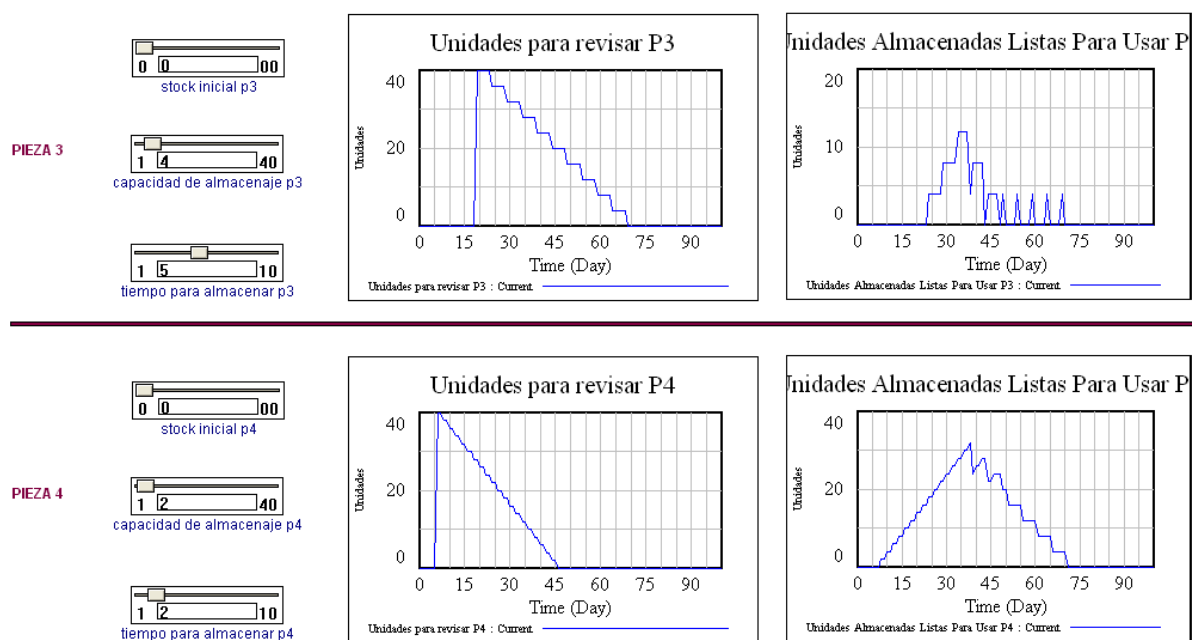
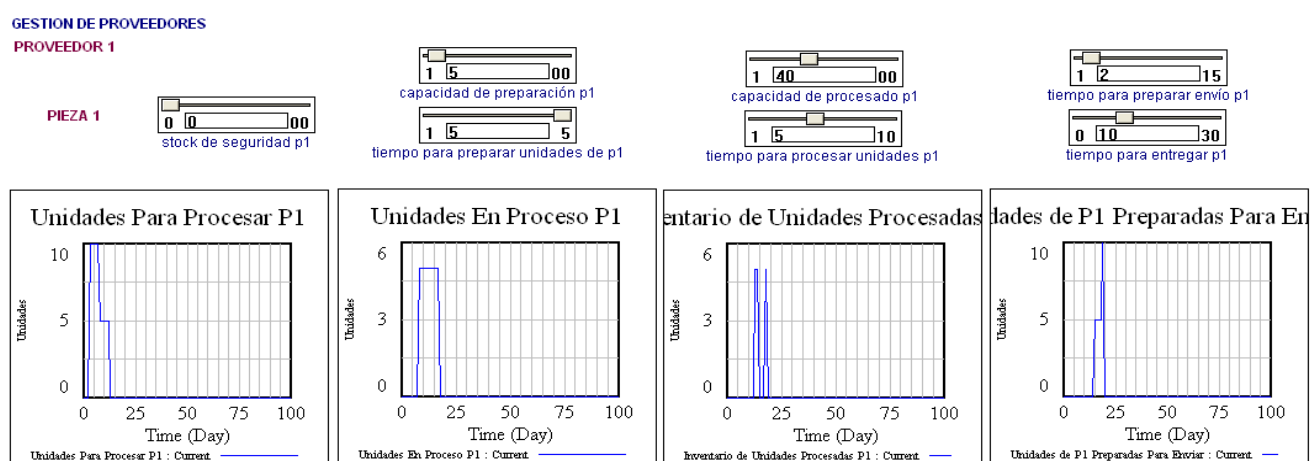


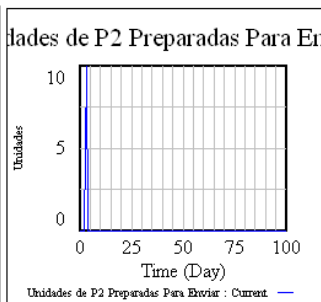
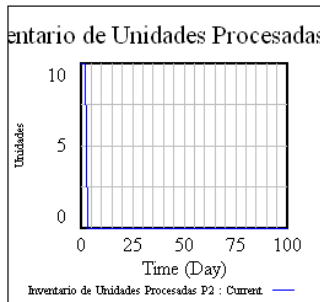
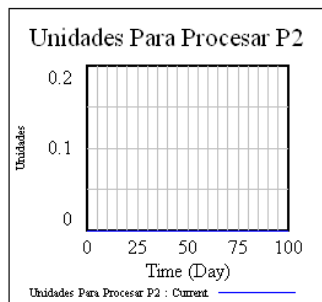
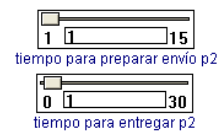
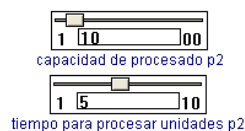
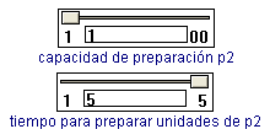
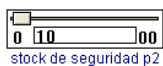
Figura 6.27 Resultados de Almacén Escenario 3

Los resultados obtenidos para los Proveedores son los siguientes [Figura6.28]:

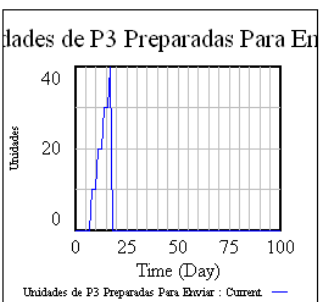
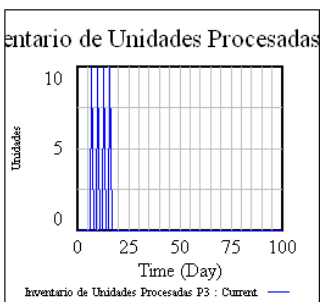
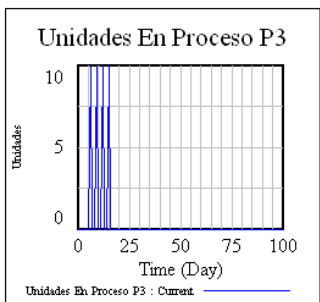
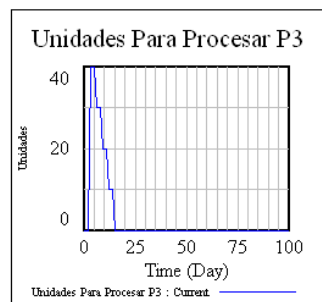
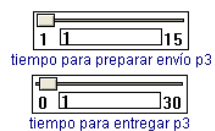
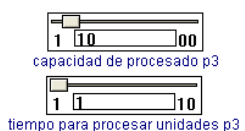
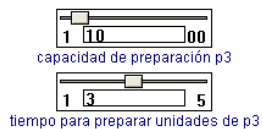
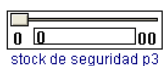


PROVEEDOR 2

PIEZA 2



PIEZA 3



PROVEEDOR 3

PIEZA 4

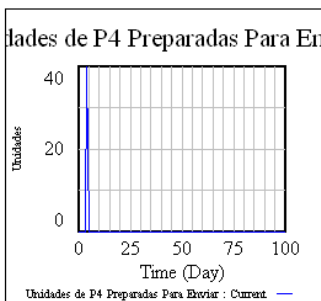
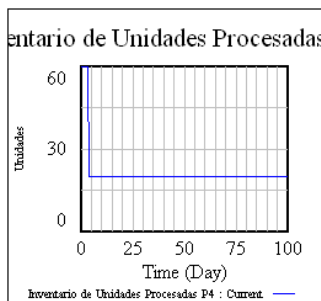
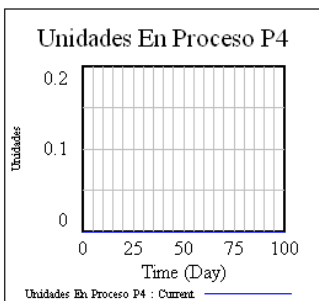
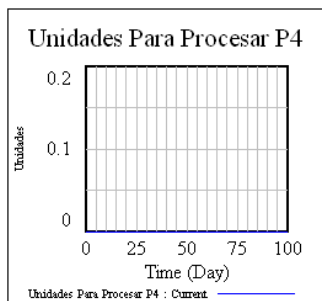
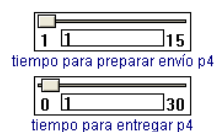
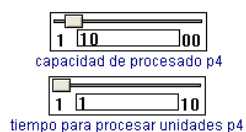
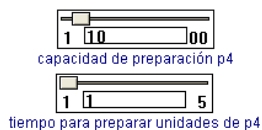
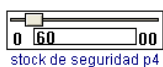


Figura 6.28 Resultados de Proveedores Escenario 3

6.8.5.3 Comentarios del Escenario 3

El Escenario 3 se ha simulado suponiendo un acuerdo con el Proveedor 2 para las piezas 2 y 3. Este acuerdo consiste en compartir el coste de almacenamiento. La cantidad de piezas p2 que se necesitan son 20 unidades. Como los procesos del Proveedor 2 no son muy eficientes y producen retrasos en la producción del producto final, se acuerda que el proveedor tenga 10 unidades de p2 en sus almacenes y a su vez el centro de producción tenga otras 10 unidades en el Almacén listas para ser usadas. De esta manera solo se produce el retraso que induce el transporte de la mercancía del proveedor al almacén.

Otra de las hipótesis para el Escenario 3 consiste en la posibilidad de que el Proveedor 2, para la fabricación de la pieza 3, reduzca el 'tiempo para preparar unidades p3' de 4 a 3 días y el 'tiempo para procesar unidades p3' de 4 a 1 días. Así como que aumente su 'capacidad de preparación p3' de 7 a 10 unidades al día.

Adicionalmente, en el centro de producción se van a mejorar los procesos de almacenaje para las piezas 3 y 4, reduciendo de 6 a 5 días el 'tiempo para almacenar p3' y aumentando de 1 a 2 unidades la 'capacidad de almacenaje p4'. Así, con estas dos últimas, los costes de mejora de productividad también se reparten entre proveedor y centro de producción.

Podemos apreciar que el 'Time to market' ó 'Fecha de entrega de pedido terminado' se ha reducido en 5 días, pasando de 78 días, en el Escenario 2, a 73 días [Tabla6.26]. Por tanto, las medidas hipotéticas que se han adoptado tendrían un efecto más beneficioso, que en los Escenarios 1 y 2, sobre la gestión global de la cadena de suministro.

Para la cadena de producción, en concreto en el Proceso 2, la cola de producto intermedio se ha visto reducida gracias a la introducción de stocks iniciales de la pieza 2 en el Almacén y en el Proveedor, así como con las mejoras de productividad del proveedor 2 en la fabricación de la pieza 3.

6.8.6 Creación de políticas para la toma de decisiones en la gestión de la Cadena de Suministro

Una vez creados los escenarios con diferentes hipótesis los gestores de la cadena de suministro están en disposición de diseñar políticas de decisión para emprender acciones correctoras, negociaciones con proveedores, modificación de procesos, etc.

La idea es poder tomar decisiones basadas en los resultados que se obtienen de la simulación del modelo. A raíz de los resultados que hemos obtenido de los tres escenarios anteriores (Escenario 1, 2 y 3) y sin tener en cuenta la parte económica dado que en este modelo no se ha considerado, podemos asegurar que la opción mas eficiente es la última, Escenario 3, pues resulta ser la que tiene el 'Time to market' más reducido. Por tanto para poner en práctica esa política el gestor debería:

1º Negociar con el Proveedor 3 las medidas mencionadas en el subapartado anterior. Gracias a un modelo como el que se ha construido, se está en disposición de comunicar a cada parte que compone la cadena de suministro, en este caso al proveedor, qué impactos está generando sobre el resto de elementos y en qué medida un cambio en su gestión o sus procesos puede favorecer a otros.

2º Tomar las medidas pertinentes para lograr la mejora de la productividad a la hora de almacenar las piezas p3 y p4, bien incrementando el numero de operarios destinados a ese fin, bien modificando el proceso de almacenaje para reducir el tiempo que éste toma.

En este caso se han construido tres escenarios solamente, adoptando diferentes hipotes. Si éste fuera un modelo con aplicaciones reales, se tendrían que realizar más hipótesis de simulación, ya que cuantas más se realicen mejores opciones para la toma de decisiones podremos obtener.

Capítulo 7

Conclusiones

Durante la realización de una beca en centro de producción perteneciente al holding empresarial de Abengoa descubrí que, en ocasiones, se producían retrasos en las entregas de pedidos a los clientes. Esto sucedía por la ausencia de herramientas de gestión que permitieran realizar previsiones basadas en los parámetros de productividad, entre otros, propios del centro de producción.

Posteriormente trabajando en la empresa Altran descubrí una metodología con la cual se pueden construir modelos de sistemas reales que pueden ser simulados para la obtención de escenarios. El valor añadido que ofrece esta metodología es que se tienen en cuenta las interferencias que existen entre los diferentes elementos de un sistema, o lo que es lo mismo, que ciertos cambios en una parte del sistema producen resultados en el comportamiento del sistema que a simple vista no se pueden preveer [Figura7.1]. Esto se conoce como no linealidad.

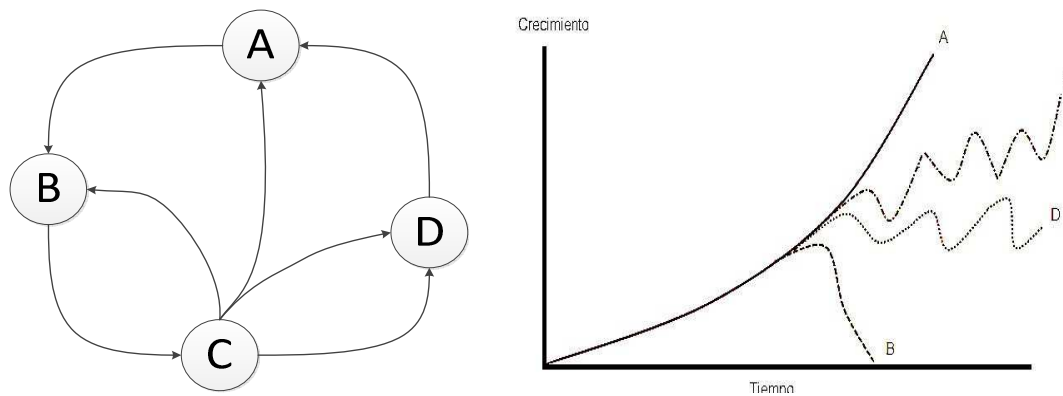


Figura 7.1 Estructura y comportamiento de un sistema

Esta metodología se basa en la teoría de la Dinámica de Sistemas, que aplicada al entorno empresarial es lo que se conoce como Business Dynamics.

Business Dynamics permite la construcción de modelos versátiles con diferentes fines y que aportan una visión diferente a la hora de gestionar procesos y de adoptar políticas para la toma de decisiones. Además constituye una metodología para construir herramientas de gestión estratégica para el medio y largo plazo.

La cadena de suministro del centro de producción donde trabajé es la inspiración para aplicar Business Dynamics y construir un modelo de gestión que permita a los gestores la toma de decisiones dentro de la cadena de suministro, así como evaluar, en función de las variables características que están presentes en el sistema, cuál será el comportamiento de la cadena de suministro. Es decir, conocer el tiempo que se tarda en disponer del producto terminado listo para entregar al cliente. También llamado 'Time to market'.

El modelo que se ha construido está basado en el esquema de la cadena de suministro del centro de producción que se presenta a continuación [Figura 7.2]. El primer paso para la construcción del modelo, después de haber fijado el objetivo principal, es identificar los elementos que posee el sistema a modelar y evaluar las interacciones que existen entre éstos con el fin de construir un modelo que se acerque lo más posible a la realidad.

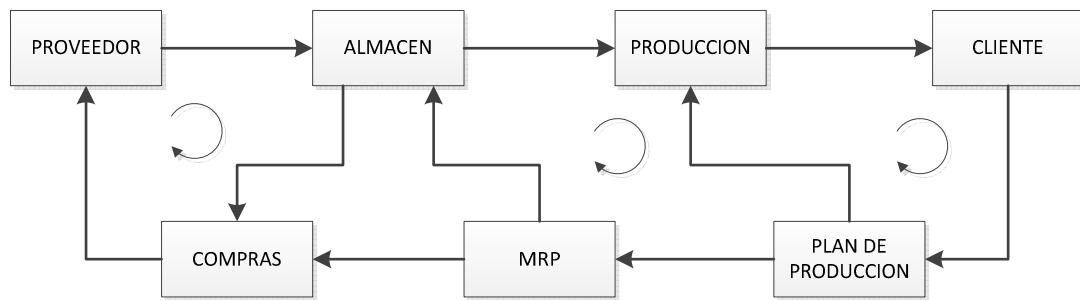


Figura 7.2 Diagrama de la cadena de suministro en el centro de producción.

Los elementos que integran el sistema son los siguientes:

- Cliente

El trabajo que se realiza en la empresa se hace bajo pedido del cliente y por tanto es este pedido el que pone en marcha toda la cadena de suministro.

- Plan de producción

Corresponde con el pedido del cliente que son las unidades que se van a fabricar. Como puede no haber piezas para producir los productos demandados, se debe utilizar un MRP.

- MRP (Material Requirements Planning)

Calcula las unidades de aprovisionamiento a partir de los pedidos de los clientes.

- Compras

Es la encargada del proceso de obtener cualquier componente que sea requerido para la fabricación de los productos pedidos por el cliente.

- Proveedor

Es el encargado de suministrar los componentes para la fabricación del producto final.

- Almacén

Su función es la de hacer de nexo entre los proveedores y la cadena de producción. De esta forma se unifican y ajustan los flujos de material que se envían a producción.

- Producción

Convierte diferentes productos a otros productos que tienen valor para un cliente.

Para la construcción del modelo ha sido necesario seguir una metodología de modelado [Figura7.3]. Partiendo del problema que queremos solucionar, se ha fijado un objetivo que se desea alcanzar, conocer el 'Time to market' y ver como es posible mejorarlo.

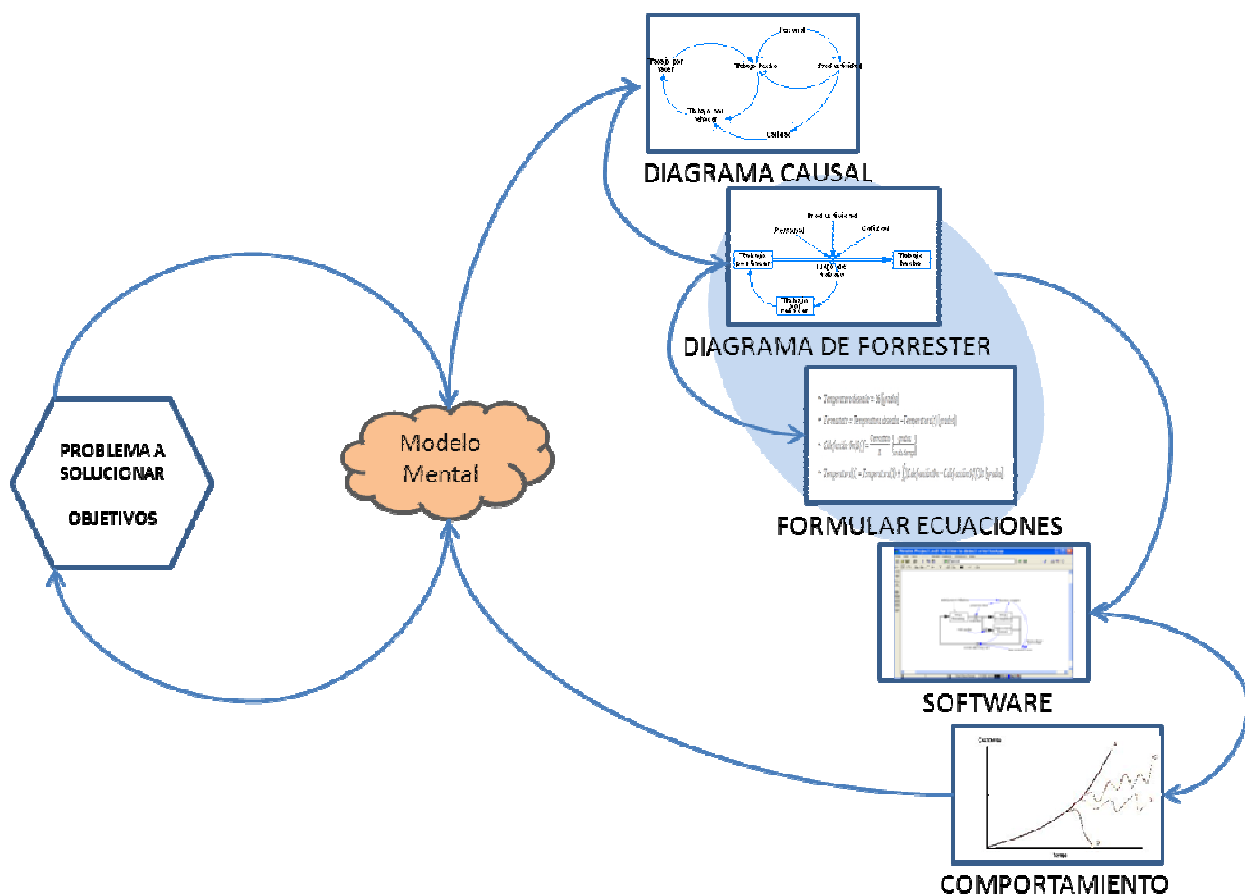


Figura 7.3 Esquema metodológico

Se ha partido de un modelo mental que representa la idea que se tiene sobre el sistema que se quiere modelar, en este caso la cadena de suministro. Después se ha trasladado este modelo mental a un diagrama causal [Figura 7.4] del sistema que deseamos gestionar utilizando los elementos del sistema identificados [Figura 7.2].

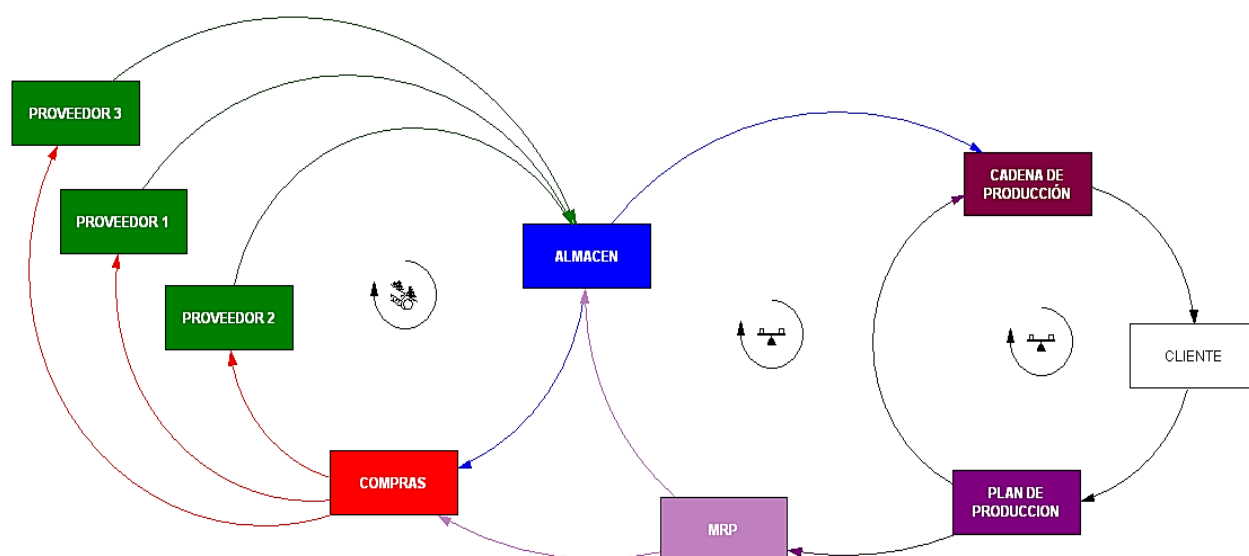


Figura 7.4 Diagrama causal para el modelo de la cadena de suministro.

El diagrama causal que se presenta aquí muestra las interacciones que existen entre cada elemento de la cadena de suministro. Una vez que se tiene el diagrama causal, se utiliza de base para desarrollar un diagrama de Forrester [Figura 7.5]. Además, se han formulado una serie de ecuaciones que definen el comportamiento del sistema.

El diagrama de Forrester representa el modelo del sistema. Pero para obtener el comportamiento de un sistema complejo es necesaria la ayuda de un software de simulación. El software empleado ha sido Vensim. Una vez se ha introducido el modelo y las ecuaciones en el software ya es posible realizar simulaciones de escenarios y obtener el comportamiento del sistema con el fin de tomar decisiones concretas que ayuden a la consecución de los objetivos marcados.

El modelo construido para la gestión de la cadena de suministro se presenta a continuación [Figura 7.5]. En él se aprecian cada uno de los elementos que constituyen el

modelo. Estos hacen referencia a cada elemento de la cadena de suministro que se identificó. También se aprecian las relaciones que existen entre estos elementos.

Por cada elemento se ha desarrollado un diagrama de Forrester constituido por las diferentes variables que están presentes en esa parte del sistema. Estas variables son las que se han utilizado para formular cada una de las ecuaciones que definen el comportamiento del sistema.

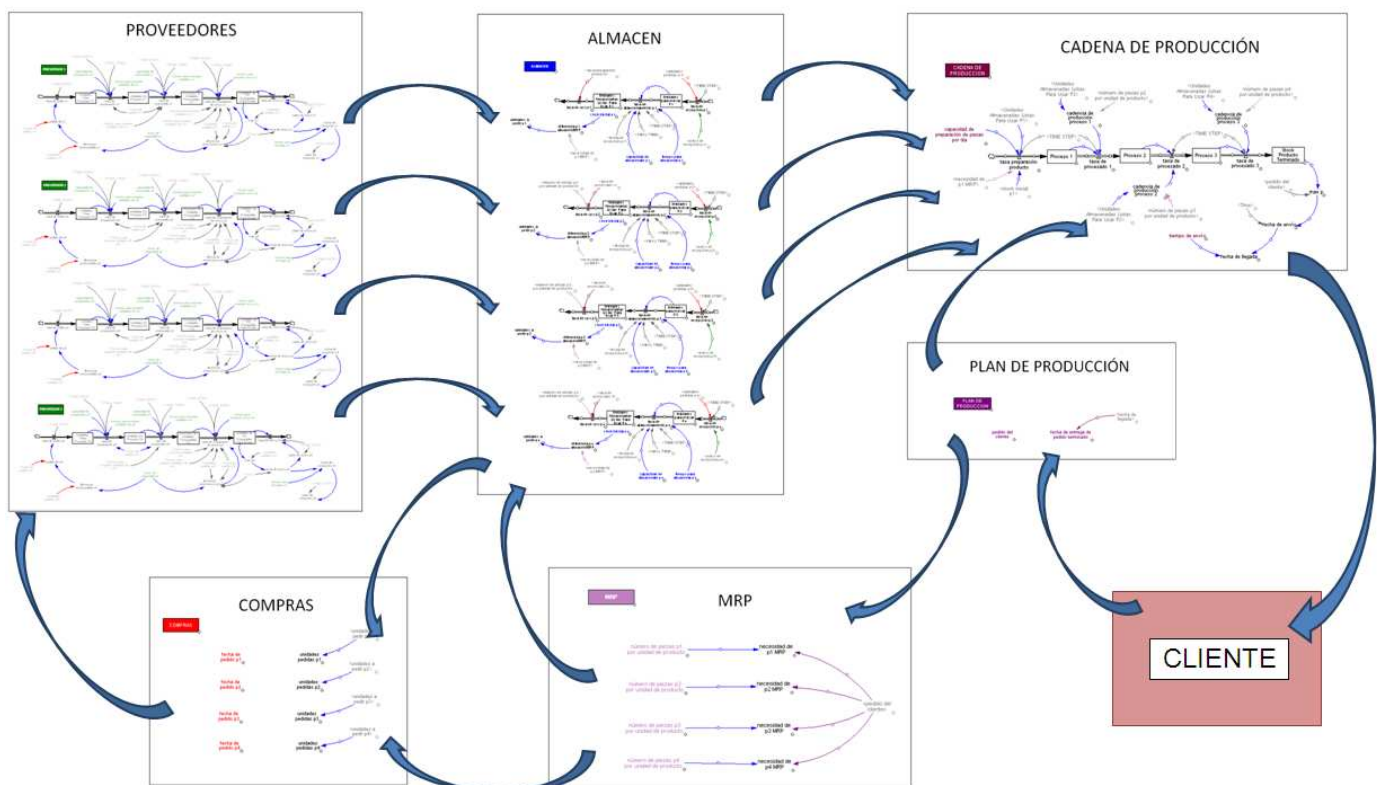


Figura 7.5 Diagrama de Forrester de la cadena de suministro.

Una vez construido y validado el modelo, se ha sometido a una serie de simulaciones obteniendo diferentes escenarios. Se ha visto que el modelo responde a los cambios que se realizan en las variables de actuación obteniendo como resultado diferentes valores para el 'Time to market'. Estos resultados posteriormente han servido para desarrollar una política de gestión de la cadena de suministro. Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar qué variables son las que mayor impacto poseen.

En concreto se han simulado tres escenarios. El primer escenario presenta las siguientes variables de entrada, que a su vez, corresponden a los valores por defecto que poseen los parámetros del centro de producción [Tabla7.1].

Plan de Producción	Valor	Unidades
<i>Pedido del cliente</i>	10	Day

MRP	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Numero de piezas px por unidad de producto</i>	1	2	4	4	Dmnl

Compras	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Fecha de pedido px</i>	2	2	2	2	Day

Proveedor 1, 2 o 3	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Capacidad de preparación px</i>	5	1	7	10	Unidades/Day
<i>Tiempo para preparar unidades px</i>	5	5	4	1	Day
<i>Capacidad de procesado px</i>	40	10	10	10	Unidades/Day
<i>Tiempo para procesar unidades px</i>	5	5	4	1	Day
<i>Tiempo para preparar envío px</i>	2	1	1	1	Day
<i>Stock de seguridad px</i>	0	4	0	60	Unidades
<i>Tiempo para entregar px</i>	10	1	1	1	Day

Almacén	Valor px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
<i>Stock inicial px</i>	0	5	0	0	Unidades
<i>Capacidad de almacenaje px</i>	2	1	4	1	Unidades/Day
<i>Tiempo para almacenar px</i>	5	1	6	2	Day

Cadena de Producción	Valor	Unidades
<i>Capacidad de preparación de piezas por día</i>	10	Unidades
<i>Tiempo de envío</i>	2	Day

Tabla 7.1 Datos del Escenario 1

Simulando el escenario descrito se obtiene el siguiente resultado [Tabla7.2]. Es posible ver que el tiempo que se tarda en entregar el pedido del cliente es de 98 días.

Plan de Producción	Valor	Unidades
Fecha de entrega de pedido terminado	98	Day

Tabla 7.2 Time to market en el Escenario 1

Partiendo de este escenario, se ha realizado un análisis de sensibilidad para comprobar que el hecho de modificar una sola variable independientemente puede tener impacto pero no tan importante como el que cabría esperar en un principio. Hemos seleccionado unas variables de actuación y se ha modificado su valor en un determinado rango [Tabla7.3].

Variables de actuación directa	Rango px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
Capacidad de almacenaje px	1-10	1-10	1-10	1-10	Unidades/Day
Tiempo para almacenar px	1-10	1-10	1-10	1-10	Day

Tabla 7.3 Variables de actuación directa

Algunos de los resultados obtenidos muestran que es posible reducir el Time to market pero no excesivamente. Incluso, se aprecia que ciertas variables no impactan sobre el Time to market pues no hay variación en él. En otros casos, existen muchos valores dentro del rango para los cuales el Time to market apenas cambia. Estos son algunos ejemplos [Tabla7.4] y [Tabla7.5].

Tiempo para almacenar p3	Time to market
1	88
2	88
4	88
5	88
6	97
8	>100
10	>100

Tabla 7.4 Tiempo para almacenar p3

Capacidad de almacenaje p4	Time to market
1	97
2	97
4	97
5	97
6	97
8	97
10	97

Tabla 7.5 Capacidad de almacenaje p4

Por el contrario si modificamos conjuntamente diferentes variables [Tabla7.6] se puede apreciar un mayor impacto, ya que conseguimos reducir el Time to market sustancialmente hasta 73 días [Tabla7.7].

Variables de actuación directa	Rango px				Unidades
	P1	P2	P3	P4	
Capacidad de almacenaje px	2	6	5	8	Unidades/Day
Tiempo para almacenar px	2	1	1	1	Day

Tabla 7.6 Variables de actuación directa modificadas

Plan de Producción	Valor	Unidades
Fecha de entrega de pedido terminado	73	Day

Tabla 7.7 Time to market en análisis de sensibilidad

El hecho de modificar las variables supone realizar mejoras en los procesos como puede ser contratar a más personal. En este caso, se vió que mejorar las capacidades de almacenaje y reducir los tiempos para almacenar ha mejorado el Time to market, pero también, habremos realizado una inversión económica que debemos valorar si resulta rentable.

En ciertas ocasiones estas mejoras producto de inversiones económicas se suelen compartir con los proveedores con el fin de repartir los costes. Es el caso de otro escenario que se ha simulado. En el Escenario 3 se ha supuesto que el Proveedor y el Almacén deberían tener un stock inicial de la pieza 2 con el fin de reducir el Time to market. Adicionalmente se ha supuesto que se podrían realizar mejoras en las

capacidades de ciertos procesos tanto en los Proveedores como en el Almacén. Estos cambios se ven reflejados a continuación marcados en negrita [Tabla7.8].

Plan de Producción	Valor	Unidades
Pedido del cliente	10	Day

MRP	P1	P2	P3	P4	Unidades
Numero de piezas px por unidad de producto	1	2	4	4	Dmnl

Compras	P1	P2	P3	P4	Unidades
Fecha de pedido px	2	2	2	2	Day

Proveedor 1, 2 o 3	P1	P2	P3	P4	Unidades
Capacidad de preparación px	5	1	10	10	Unidades/Day
Tiempo para preparar unidades px	5	5	3	1	Day
Capacidad de procesado px	40	10	10	10	Unidades/Day
Tiempo para procesar unidades px	5	5	1	1	Day
Tiempo para preparar envío px	2	1	1	1	Day
Stock de seguridad px	0	10	0	60	Unidades
Tiempo para entregar px	10	1	1	1	Day

Almacén	P1	P2	P3	P4	Unidades
Stock inicial px	0	10	0	0	Unidades
Capacidad de almacenaje px	2	1	4	2	Unidades/Day
Tiempo para almacenar px	5	1	5	2	Day

Cadena de Producción	Valor	Unidades
Capacidad de preparación de piezas por día	10	Unidades
Tiempo de envío	2	Day

Tabla 7.8 Datos del Escenario 3

Simulando el escenario descrito con los parámetros anteriores es posible acordar una política de toma de decisiones para la gestión de la cadena de suministro. El Time to market se ha visto reducido a 73 días [Tabla 7.9], gracias a las hipótesis que hemos adoptado. En concreto se puede decir que compartir costes con el proveedor además de tener información transparente de todos los elementos de la cadena de suministro se traduce en beneficios para los integrantes de ésta.

Plan de Producción	Valor	Unidades
<i>Fecha de entrega de pedido terminado</i>	73	Day

Tabla 7.9 Time to market en el Escenario 3

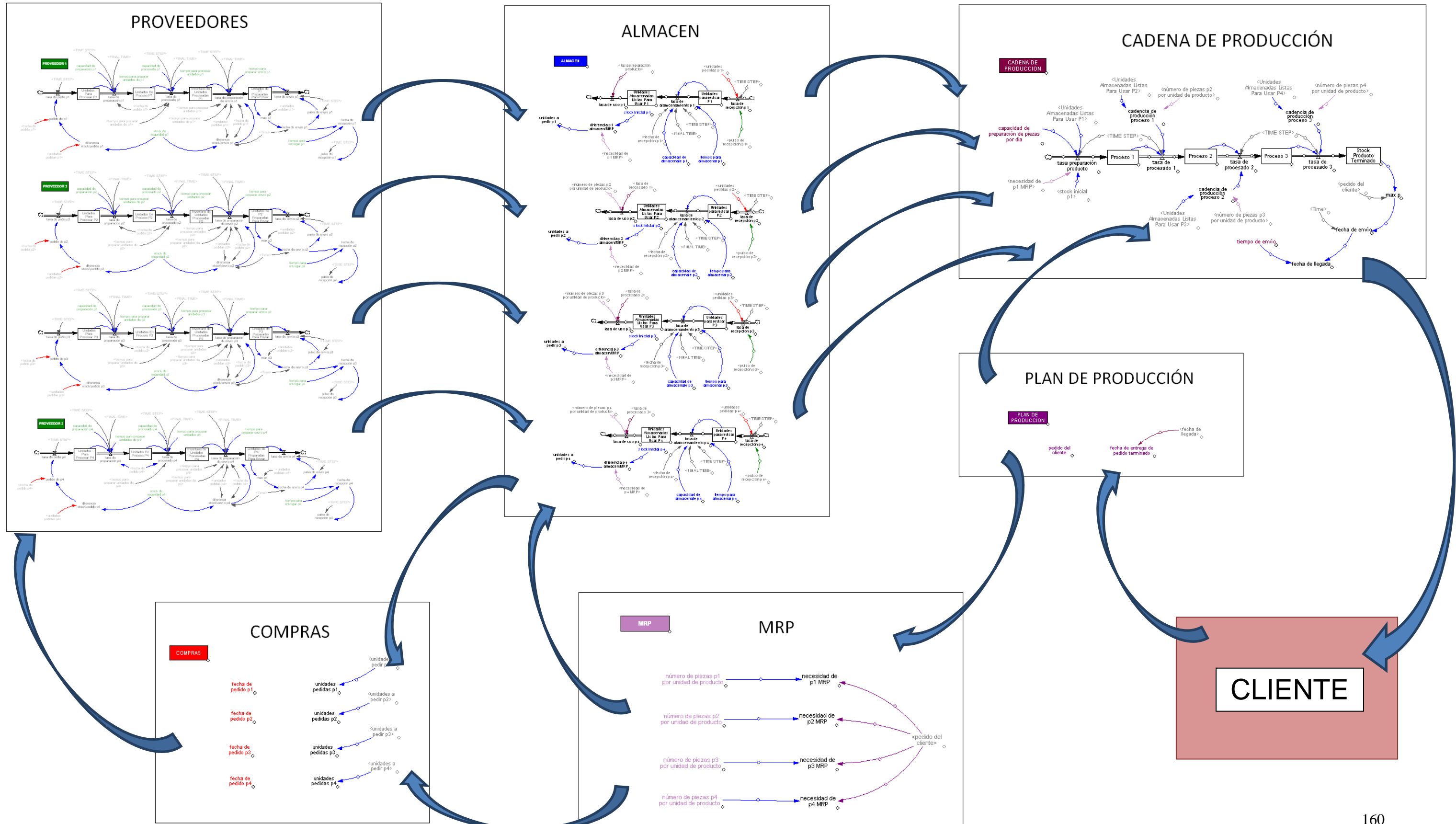
Gracias a los resultados obtenidos de las simulaciones, se puede afirmar que el modelo construido para la gestión de la cadena de suministro permite tener una visión global del comportamiento de la cadena de suministro, aportando visibilidad de la situación de los cuellos de botella, niveles de stocks tanto de materia prima, producto intermedio o producto terminado y la posibilidad de conocer los lead times y time to market.

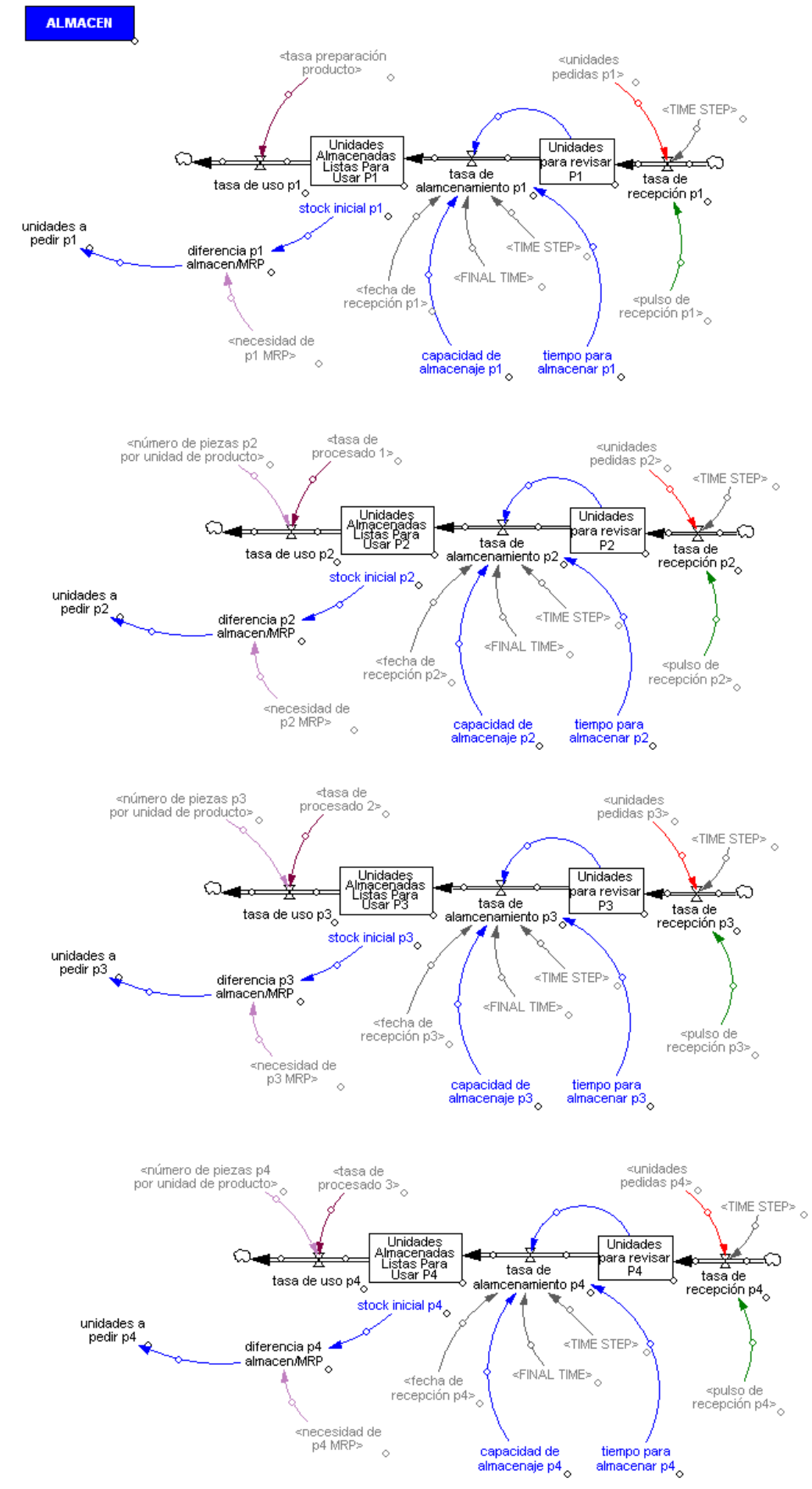
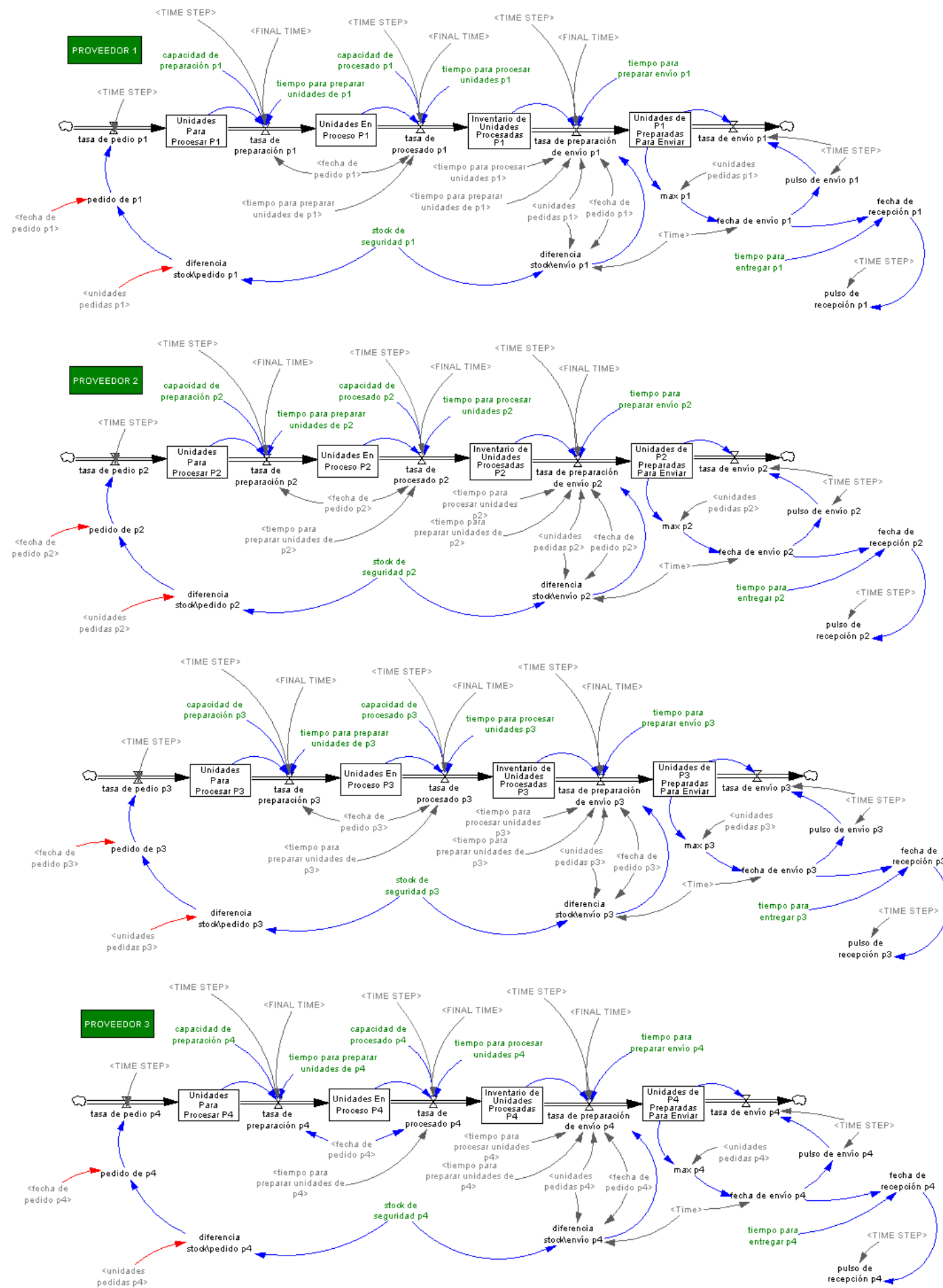
Por tanto, considero que el uso del presente modelo en el centro de producción descrito, una vez adaptado para su uso en una aplicación real, mejoraría la forma de gestionar los procesos involucrados en la cadena de suministro de la empresa. La ventaja principal es que la empresa, haciendo uso de este modelo, puede ser capaz de realizar previsiones en las que basar presupuestos que se realicen a los clientes, dando tiempos de entrega más realistas, en base a las simulaciones que se realicen. O incluso, mejorar los procesos del centro de producción.

Referencias

- [Aracil, 1995] J. Aracil; *Dinámica de Sistemas*. Edición publicada por ISDEFE (1995, España)
- [Beamon, 1998] B M. Beamon; *Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods* (1998, Washington, USA)
- [Cooper, 2009] K. Cooper; *Managing the Dynamics of Projects and Changes at Fluor* (2009, USA)
- [Forrester y Senge, 1980] J. Forrester, P. Senge; *Tests for building confidence in System Dynamics Model, TIMS Studies in the Management Sciences, Vol 14, pp209-228.*
- [Huang, 2012] X. Huang; *Modeling Start-ups using System Dynamics: Towards a generic model* (2012, Warwick Business School, UK)
- [Martín, 2007] J. Martín; *Manual de Vensim. Traducción autorizada por Ventana Systems Inc* (2007, España)
- [Morvin, 2009] M. Morvin; *Validation of simulation based model. A theoretical outlook* (2009, Manipal Institute of Technology, India)
- [Senge, 1994] P. Senge; *La quinta disciplina* (1994, Nueva York)
- [Sterman, 2000] John D. Sterman; *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for a Complex World* (2000, Massachusetts Institute of Technology, USA)
- [SDS] Systems Dynamics Society, <http://www.systemdynamics.org/>

Anexo I – Modelo Completo





Anexo II - Ecuaciones

(001) cadencia de producción proceso 1=
 INTEGER(ZIDZ(Unidades Almacenadas Listas Para Usar P2,número de
piezas p2 por unidad de producto
))
 Units: Unidades

(002) cadencia de producción proceso 2=
 INTEGER(ZIDZ(Unidades Almacenadas Listas Para Usar P3,número de
piezas p3 por unidad de producto
))
 Units: Unidades

(003) cadencia de producción proceso 3=
 INTEGER(ZIDZ(Unidades Almacenadas Listas Para Usar P4,número de
piezas p4 por unidad de producto
))
 Units: Unidades

(004) capacidad de almacenaje p1=
 1
 Units: Unidades/Day [1,40,1]

(005) capacidad de almacenaje p2=
 1
 Units: Unidades/Day [1,40,1]

(006) capacidad de almacenaje p3=
 1
 Units: Unidades/Day [1,40,1]

(007) capacidad de almacenaje p4=
 1
 Units: Unidades/Day [1,40,1]

(008) capacidad de preparación de piezas por día=
 1

Units: Unidades [1,20,1]

(009) capacidad de preparación p1=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(010) capacidad de preparación p2=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(011) capacidad de preparación p3=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(012) capacidad de preparación p4=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(013) capacidad de procesado p1=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(014) capacidad de procesado p2=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(015) capacidad de procesado p3=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(016) capacidad de procesado p4=
10

Units: Unidades/Day [1,?,1]

(017) "diferencia p1 almacen/MRP"=

IF THEN ELSE(necesidad de p1 MRP<=stock inicial p1,0,necesidad de p1

MRP-

stock inicial p1)

Units: Unidades

necesidad de p1 MRP-Unidades Almacenadas Listas Para Usar P1

(018) "diferencia p2 almacen/MRP"=

IF THEN ELSE(necesidad de p2 MRP<=stock inicial p2,0,necesidad de p2

MRP-

stock inicial p2)

Units: Unidades

(019) "diferencia p3 almacen/MRP"=
 IF THEN ELSE(necesidad de p3 MRP<=stock inicial p3,0,necesidad de p3
 MRP-
 stock inicial p3)
 Units: Unidades

(020) "diferencia p4 almacen/MRP"=
 IF THEN ELSE(necesidad de p4 MRP<=stock inicial p4,0,necesidad de p4
 MRP-
 stock inicial p4)
 Units: Unidades
 necesidad de p1 MRP-Unidades Almacenadas Listas Para Usar P1

(021) "diferencia stock\envío p1"=
 IF THEN ELSE(stock de seguridad p1>=unidades pedidas
 p1:AND:Time>=fecha de pedido p1
 ,unidades pedidas p1,0)
 Units: Unidades

(022) "diferencia stock\envío p2"=
 IF THEN ELSE(stock de seguridad p2>=unidades pedidas
 p2:AND:Time>=fecha de pedido p2
 ,unidades pedidas p2,0)
 Units: Unidades

(023) "diferencia stock\envío p3"=
 IF THEN ELSE(stock de seguridad p3>=unidades pedidas
 p3:AND:Time>=fecha de pedido p3
 ,unidades pedidas p3,0)
 Units: Unidades

(024) "diferencia stock\envío p4"=
 IF THEN ELSE(stock de seguridad p4>=unidades pedidas
 p4:AND:Time>=fecha de pedido p4
 ,unidades pedidas p4,0)
 Units: Unidades

(025) "diferencia stock\pedido p1"=
 unidades pedidas p1-stock de seguridad p1
 Units: Unidades

(026) "diferencia stock\pedido p2"=
 unidades pedidas p2-stock de seguridad p2
 Units: Unidades

(027) "diferencia stock\pedido p3"=
 unidades pedidas p3-stock de seguridad p3

Units: Unidades

(028) "diferencia stock\pedido p4"=
unidades pedidas p4-stock de seguridad p4

Units: Unidades

(029) fecha de entrega de pedido terminado=
fecha de llegada

Units: Day

(030) fecha de envío=
SAMPLE IF TRUE(:NOT:fecha de envío:AND:max p,Time,0)

Units: Day

(031) fecha de envío p1=
SAMPLE IF TRUE(:NOT:fecha de envío p1:AND:max p1,Time,0)

Units: Day

(032) fecha de envío p2=
SAMPLE IF TRUE(:NOT:fecha de envío p2:AND:max p2,Time,0)

Units: Day

(033) fecha de envío p3=
SAMPLE IF TRUE(:NOT:fecha de envío p3:AND:max p3,Time,0)

Units: Day

(034) fecha de envío p4=
SAMPLE IF TRUE(:NOT:fecha de envío p4:AND:max p4,Time,0)

Units: Day

(035) fecha de llegada=
IF THEN ELSE(fecha de envío>0,STEP(fecha de envío+tiempo de
envío,fecha de envío
+tiempo de envío),0)

Units: Day

(036) fecha de pedido p1=
2

Units: Day [0,365,1]

(037) fecha de pedido p2=
2

Units: Day [0,365,1]

(038) fecha de pedido p3=
2

Units: Day [0,365,1]

- (039) fecha de pedido p4=
2
Units: Day [0,365,1]
- (040) fecha de recepción p1=
IF THEN ELSE(fecha de envío p1>0,STEP(fecha de envío p1+tiempo para
entregar p1
,fecha de envío p1+tiempo para entregar p1),0)
Units: Day
- (041) fecha de recepción p2=
IF THEN ELSE(fecha de envío p2>0,STEP(fecha de envío p2+tiempo para
entregar p2
,fecha de envío p2+tiempo para entregar p2),0)
Units: Day
- (042) fecha de recepción p3=
IF THEN ELSE(fecha de envío p3>0,STEP(fecha de envío p3+tiempo para
entregar p3
,fecha de envío p3+tiempo para entregar p3),0)
Units: Day
- (043) fecha de recepción p4=
IF THEN ELSE(fecha de envío p4>0,STEP(fecha de envío p4+tiempo para
entregar p4
,fecha de envío p4+tiempo para entregar p4),0)
Units: Day
- (044) FINAL TIME = 100
Units: Day [100,100]
The final time for the simulation.
- (045) INITIAL TIME = 0
Units: Day
The initial time for the simulation.
- (046) Inventario de Unidades Procesadas P1= INTEG (
tasa de procesado p1-tasa de preparación de envío p1,
stock de seguridad p1)
Units: Unidades
- (047) Inventario de Unidades Procesadas P2= INTEG (
tasa de procesado p2-tasa de preparación de envío p2,
stock de seguridad p2)
Units: Unidades

- (048) Inventario de Unidades Procesadas P3= INTEG (
tasa de procesado p3-tasa de preparación de envío p3,
stock de seguridad p3)
Units: Unidades
- (049) Inventario de Unidades Procesadas P4= INTEG (
tasa de procesado p4-tasa de preparación de envío p4,
stock de seguridad p4)
Units: Unidades
- (050) max p=
IF THEN ELSE(Stock Producto Terminado=pedido del cliente,1,0)
Units: Dmnl
- (051) max p1=
IF THEN ELSE(Unidades de P1 Preparadas Para Enviar=unidades pedidas
p1,1,
0)
Units: Day
- (052) max p2=
IF THEN ELSE(Unidades de P2 Preparadas Para Enviar=unidades pedidas
p2,1,
0)
Units: Day
- (053) max p3=
IF THEN ELSE(Unidades de P3 Preparadas Para Enviar=unidades pedidas
p3,1,
0)
Units: Day
- (054) max p4=
IF THEN ELSE(Unidades de P4 Preparadas Para Enviar=unidades pedidas
p4,1,
0)
Units: Day
- (055) necesidad de p1 MRP=
número de piezas p1 por unidad de producto*pedido del cliente
Units: Unidades [0,?]
- (056) necesidad de p2 MRP=
número de piezas p2 por unidad de producto*pedido del cliente
Units: Unidades
- (057) necesidad de p3 MRP=

número de piezas p3 por unidad de producto*pedido del cliente
Units: Unidades

(058) necesidad de p4 MRP=
número de piezas p4 por unidad de producto*pedido del cliente
Units: Unidades

(059) número de piezas p1 por unidad de producto=
1
Units: Dmnl [0,?,1]

(060) número de piezas p2 por unidad de producto=
2
Units: Dmnl

(061) número de piezas p3 por unidad de producto=
4
Units: Dmnl

(062) número de piezas p4 por unidad de producto=
4
Units: Dmnl

(063) pedido de p1=
IF THEN ELSE("diferencia stock\pedido p1">=0,"diferencia stock\pedido
p1"
*(PULSE(fecha de pedido p1,1)),0)
Units: Unidades
unidades p1 x dia*(PULSE(50,200))

(064) pedido de p2=
IF THEN ELSE("diferencia stock\pedido p2">=0,"diferencia stock\pedido
p2"
*(PULSE(fecha de pedido p2,1)),0)
Units: Unidades
unidades p1 x dia*(PULSE(50,200))

(065) pedido de p3=
IF THEN ELSE("diferencia stock\pedido p3">=0,"diferencia stock\pedido
p3"
*(PULSE(fecha de pedido p3,1)),0)
Units: Unidades
unidades p1 x dia*(PULSE(50,200))

(066) pedido de p4=
IF THEN ELSE("diferencia stock\pedido p4">=0,"diferencia stock\pedido
p4"

*(PULSE(fecha de pedido p4,1)),0)

Units: Unidades

unidades p1 x dia*(PULSE(50,200))

(067) pedido del cliente=
10

Units: Unidades [0,?,10]

(068) Proceso 1= INTEG (
tasa preparación producto-tasa de procesado 1,
0)

Units: Unidades

(069) Proceso 2= INTEG (
tasa de procesado 1-tasa de procesado 2,
0)

Units: Unidades

(070) Proceso 3= INTEG (
tasa de procesado 2-tasa de procesado 3,
0)

Units: Unidades

(071) pulso de envío p1=
ZIDZ(fecha de envío p1,fecha de envío p1)-STEP(ZIDZ(fecha de envío p1,
fecha de envío p1),fecha de envío p1+TIME STEP)

Units: Dmnl

(072) pulso de envío p2=
ZIDZ(fecha de envío p2,fecha de envío p2)-STEP(ZIDZ(fecha de envío p2,
fecha de envío p2),fecha de envío p2+TIME STEP)

Units: Dmnl

(073) pulso de envío p3=
ZIDZ(fecha de envío p3,fecha de envío p3)-STEP(ZIDZ(fecha de envío p3,
fecha de envío p3),fecha de envío p3+TIME STEP)

Units: Dmnl

(074) pulso de envío p4=
ZIDZ(fecha de envío p4,fecha de envío p4)-STEP(ZIDZ(fecha de envío p4,
fecha de envío p4),fecha de envío p4+TIME STEP)

Units: Dmnl

(075) pulso de recepción p1=
ZIDZ(fecha de recepción p1,fecha de recepción p1)-STEP(ZIDZ(fecha de
recepción p1
,fecha de recepción p1),fecha de recepción p1+TIME STEP)

Units: Dmnl

(076) pulso de recepción p2=
ZIDZ(fecha de recepción p2,fecha de recepción p2)-STEP(ZIDZ(fecha de
recepción p2
,fecha de recepción p2),fecha de recepción p2+TIME STEP)
Units: Dmnl

(077) pulso de recepción p3=
ZIDZ(fecha de recepción p3,fecha de recepción p3)-STEP(ZIDZ(fecha de
recepción p3
,fecha de recepción p3),fecha de recepción p3+TIME STEP)
Units: Dmnl

(078) pulso de recepción p4=
ZIDZ(fecha de recepción p4,fecha de recepción p4)-STEP(ZIDZ(fecha de
recepción p4
,fecha de recepción p4),fecha de recepción p4+TIME STEP)
Units: Dmnl

(079) SAVEPER =
TIME STEP
Units: Day [0,?]
The frequency with which output is stored.

(080) stock de seguridad p1=
0
Units: Unidades [0,100,1]

(081) stock de seguridad p2=
0
Units: Unidades [0,100,1]

(082) stock de seguridad p3=
0
Units: Unidades [0,100,1]

(083) stock de seguridad p4=
0
Units: Unidades [0,100,1]

(084) stock inicial p1=
0
Units: Unidades [0,500]

(085) stock inicial p2=
0

Units: Unidades [0,500]

(086) stock inicial p3=
0

Units: Unidades [0,500]

(087) stock inicial p4=
0

Units: Unidades [0,500]

(088) Stock Producto Terminado= INTEG (
tasa de procesado 3,
0)

Units: Unidades

(089) tasa de almacenamiento p1=
MIN(capacidad de almacenaje p1,Unidades para revisar P1/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
(fecha de recepción p1,1,tiempo para almacenar p1,FINAL TIME
))

Units: Unidades/Day

(090) tasa de almacenamiento p2=
MIN(capacidad de almacenaje p2,Unidades para revisar P2/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
(fecha de recepción p2,1,tiempo para almacenar p2
,FINAL TIME
))

Units: Unidades/Day

(091) tasa de almacenamiento p3=
MIN(capacidad de almacenaje p3,Unidades para revisar P3/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
(fecha de recepción p3,1,tiempo para almacenar p3
,FINAL TIME
))

Units: Unidades/Day

(092) tasa de almacenamiento p4=
MIN(capacidad de almacenaje p4,Unidades para revisar P4/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
(fecha de recepción p4,1,tiempo para almacenar p4
,FINAL TIME
))

Units: Unidades/Day

(093) tasa de envío p1=

(Unidades de P1 Preparadas Para Enviar*pulso de envío p1)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(094) tasa de envío p2=
(Unidades de P2 Preparadas Para Enviar*pulso de envío p2)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(095) tasa de envío p3=
(Unidades de P3 Preparadas Para Enviar*pulso de envío p3)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(096) tasa de envío p4=
(Unidades de P4 Preparadas Para Enviar*pulso de envío p4)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(097) tasa de pedido p1=
pedido de p1/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(098) tasa de pedido p2=
pedido de p2/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(099) tasa de pedido p3=
pedido de p3/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(100) tasa de pedido p4=
pedido de p4/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(101) tasa de preparación de envío p1=
IF THEN ELSE(unidades pedidas p1=0,0,IF THEN ELSE("diferencia
stock\envío p1"
>0,("diferencia stock\envío p1"/TIME STEP
)*(PULSE(fecha de pedido p1+tiempo para preparar envío p1,TIME
STEP)),(Inventario de Unidades Procesadas P1
/TIME STEP)*
(PULSE TRAIN
(fecha de pedido p1+tiempo para preparar unidades de p1+tiempo para
procesar unidades p1
,1,tiempo para preparar envío p1
,FINAL TIME))))
Units: Unidades/Day
IF THEN ELSE(d>0,MIN(capacidad de envio p1,d/TIME STEP)*(PULSE
TRAIN(fecha de pedido p1 ,1,tiempo de envio p1,FINAL

```

TIME)),MIN(capacidad de envio p1,Inventario P1/TIME
STEP)*(PULSE
TRAIN(fecha de pedido p1+tiempo de preparacion p1+tiempo en
procesar cada unidad de p1,1,tiempo de envio p1,FINAL TIME)))

```

```

(102) tasa de preparación de envío p2=
IF THEN ELSE(unidades pedidas p2=0,0,IF THEN ELSE("diferencia
stock\envío p2"
>0,("diferencia stock\envío p2"/TIME STEP
)*(PULSE(fecha de pedido p2+tiempo para preparar envío p2,TIME
STEP)),(Inventario de Unidades Procesadas P2
/TIME STEP)
*
(PULSE TRAIN
(fecha de pedido p2+tiempo para preparar unidades de p2+tiempo para
procesar unidades p2
,1,tiempo para preparar envío p2
,FINAL TIME))))
Units: Unidades/Day
IF THEN ELSE(d>0,MIN(capacidad de envio p1,d/TIME STEP)*(PULSE
TRAIN(fecha de pedido p1 ,1,tiempo de envio p1,FINAL
TIME)),MIN(capacidad de envio p1,Inventario P1/TIME
STEP)*(PULSE
TRAIN(fecha de pedido p1+tiempo de preparacion p1+tiempo en
procesar cada unidad de p1,1,tiempo de envio p1,FINAL TIME)))

```

```

(103) tasa de preparación de envío p3=
IF THEN ELSE(unidades pedidas p3=0,0,IF THEN ELSE("diferencia
stock\envío p3"
>0,("diferencia stock\envío p3"/TIME STEP
)*(PULSE(fecha de pedido p3+tiempo para preparar envío p3,TIME
STEP)),(Inventario de Unidades Procesadas P3
/TIME STEP)
*
(PULSE TRAIN
(fecha de pedido p3+tiempo para preparar unidades de p3+tiempo para
procesar unidades p3
,1,tiempo para preparar envío p3
,FINAL TIME))))
Units: Unidades/Day
IF THEN ELSE(d>0,MIN(capacidad de envio p1,d/TIME STEP)*(PULSE
TRAIN(fecha de pedido p1 ,1,tiempo de envio p1,FINAL
TIME)),MIN(capacidad de envio p1,Inventario P1/TIME
STEP)*(PULSE
TRAIN(fecha de pedido p1+tiempo de preparacion p1+tiempo en
procesar cada unidad de p1,1,tiempo de envio p1,FINAL TIME)))

```

(104) tasa de preparación de envío p4=
 IF THEN ELSE(unidades pedidas p4=0,0,IF THEN ELSE("diferencia
 stock\envío p4"
 >0,("diferencia stock\envío p4"/TIME STEP
)*(PULSE(fecha de pedido p4+tiempo para preparar envío p4,TIME
 STEP)),(Inventario de Unidades Procesadas P4
 /TIME STEP)
 *
 (PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p4+tiempo para preparar unidades de p4+tiempo para
 procesar unidades p4
 ,1,tiempo para preparar envío p4
 ,FINAL TIME))))
 Units: Unidades/Day
 IF THEN ELSE(d>0,MIN(capacidad de envio p1,d/TIME STEP)*(PULSE
 TRAIN(fecha de pedido p1 ,1,tiempo de envio p1,FINAL
 TIME)),MIN(capacidad de envio p1,Inventario P1/TIME
 STEP)*(PULSE
 TRAIN(fecha de pedido p1+tiempo de preparacion p1+tiempo en
 procesar cada unidad de p1,1,tiempo de envio p1,FINAL TIME))))

(105) tasa de preparación p1=
 MIN(capacidad de preparación p1,Unidades Para Procesar P1/TIME
 STEP)*(PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p1,1,tiempo para preparar unidades de p1
 ,FINAL TIME
))
 Units: Unidades/Day
 MIN(capacidad preparacion p1,XIDZ(Unds P1 Por Procesar,tiempo de
 preparacion p1,0))

(106) tasa de preparación p2=
 MIN(capacidad de preparación p2,Unidades Para Procesar P2/TIME
 STEP)*(PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p2,1,tiempo para preparar unidades de p2
 ,FINAL TIME
))
 Units: Unidades/Day
 MIN(capacidad preparacion p1,XIDZ(Unds P1 Por Procesar,tiempo de
 preparacion p1,0))

(107) tasa de preparación p3=
 MIN(capacidad de preparación p3,Unidades Para Procesar P3/TIME
 STEP)*(PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p3,1,tiempo para preparar unidades de p3
 ,FINAL TIME
))

Units: Unidades/Day

MIN(capacidad preparacion p1,XIDZ(Unds P1 Por Procesar,tiempo de preparacion p1,0))

(108) tasa de preparación p4=
 MIN(capacidad de preparación p4,Unidades Para Procesar P4/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p4,1,tiempo para preparar unidades de p4
 ,FINAL TIME
))

Units: Unidades/Day

MIN(capacidad preparacion p1,XIDZ(Unds P1 Por Procesar,tiempo de preparacion p1,0))

(109) tasa de procesado 1=
 MIN(cadencia de producción proceso 1,Proceso 1)/TIME STEP

Units: Unidades/Day

(110) tasa de procesado 2=
 MIN(cadencia de producción proceso 2,Proceso 2)/TIME STEP

Units: Unidades/Day

(111) tasa de procesado 3=
 MIN(cadencia de producción proceso 3,Proceso 3)/TIME STEP

Units: Unidades/Day

(112) tasa de procesado p1=
 MIN(capacidad de procesado p1,Unidades En Proceso P1/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p1+tiempo para preparar unidades de p1
 ,1,tiempo para procesar unidades p1
 ,FINAL TIME))

Units: Unidades/Day

MIN(capacidad de procesado p1,XIDZ(Unds P1 En Proceso,tiempo en procesar cada unidad de p1,0))

(113) tasa de procesado p2=
 MIN(capacidad de procesado p2,Unidades En Proceso P2/TIME
STEP)*(PULSE TRAIN
 (fecha de pedido p2+tiempo para preparar unidades de p2
 ,1,tiempo para procesar unidades p2
 ,FINAL TIME))

Units: Unidades/Day

MIN(capacidad de procesado p1,XIDZ(Unds P1 En Proceso,tiempo en procesar cada unidad de p1,0))

(114) tasa de procesado p3=

MIN(capacidad de procesado p3, Unidades En Proceso P3/TIME STEP)*(PULSE TRAIN (fecha de pedido p3+tiempo para preparar unidades de p3 ,1, tiempo para procesar unidades p3 ,FINAL TIME))

Units: Unidades/Day

MIN(capacidad de procesado p1, XIDZ(Unds P1 En Proceso, tiempo en procesar cada unidad de p1, 0))

(115) tasa de procesado p4=
MIN(capacidad de procesado p4, Unidades En Proceso P4/TIME STEP)*(PULSE TRAIN (fecha de pedido p4+tiempo para preparar unidades de p4 ,1, tiempo para procesar unidades p4 ,FINAL TIME))

Units: Unidades/Day

MIN(capacidad de procesado p1, XIDZ(Unds P1 En Proceso, tiempo en procesar cada unidad de p1, 0))

(116) tasa de recepción p1=
(unidades pedidas p1*pulso de recepción p1)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(117) tasa de recepción p2=
(unidades pedidas p2*pulso de recepción p2)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(118) tasa de recepción p3=
(unidades pedidas p3*pulso de recepción p3)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(119) tasa de recepción p4=
(unidades pedidas p4*pulso de recepción p4)/TIME STEP
Units: Unidades/Day

(120) tasa de uso p1=
tasa preparación producto
Units: Unidades/Day

(121) tasa de uso p2=
tasa de procesado 1*número de piezas p2 por unidad de producto
Units: Unidades/Day

(122) tasa de uso p3=
tasa de procesado 2*número de piezas p3 por unidad de producto
Units: Unidades/Day

- (123) tasa de uso p4=
 tasa de procesado 3*número de piezas p4 por unidad de producto
 Units: Unidades/Day
- (124) tasa preparación producto=
 IF THEN ELSE(stock inicial p1>necesidad de p1 MRP,necesidad de p1
 MRP*PULSE
 (0,1),MIN(capacidad de preparación de piezas por dia,Unidades Almacenadas
 Listas Para Usar P1
))/TIME STEP
 Units: Unidades/Day
- (125) tiempo de envío=
 1
 Units: Day [0,10]
- (126) tiempo para almacenar p1=
 1
 Units: Day [1,10,1]
- (127) tiempo para almacenar p2=
 1
 Units: Day [1,10,1]
- (128) tiempo para almacenar p3=
 1
 Units: Day [1,10,1]
- (129) tiempo para almacenar p4=
 1
 Units: Day [1,10,1]
- (130) tiempo para entregar p1=
 0
 Units: Day [0,30,1]
- (131) tiempo para entregar p2=
 0
 Units: Day [0,30,1]
- (132) tiempo para entregar p3=
 0
 Units: Day [0,30,1]
- (133) tiempo para entregar p4=
 0
 Units: Day [0,30,1]

- (134) tiempo para preparar envío p1=
1
Units: Day [1,15,1]
- (135) tiempo para preparar envío p2=
1
Units: Day [1,15,1]
- (136) tiempo para preparar envío p3=
1
Units: Day [1,15,1]
- (137) tiempo para preparar envío p4=
1
Units: Day [1,15,1]
- (138) tiempo para preparar unidades de p1=
1
Units: Day [1,5,1]
- (139) tiempo para preparar unidades de p2=
1
Units: Day [1,5,1]
- (140) tiempo para preparar unidades de p3=
1
Units: Day [1,5,1]
- (141) tiempo para preparar unidades de p4=
1
Units: Day [1,5,1]
- (142) tiempo para procesar unidades p1=
1
Units: Day [1,10,1]
- (143) tiempo para procesar unidades p2=
1
Units: Day [1,10,1]
- (144) tiempo para procesar unidades p3=
1
Units: Day [1,10,1]
- (145) tiempo para procesar unidades p4=
1

Units: Day [1,10,1]

(146) TIME STEP = 1

Units: Day [1,1]

The time step for the simulation.

(147) unidades a pedir p1=

"diferencia p1 almacen/MRP"

Units: Unidades

(148) unidades a pedir p2=

"diferencia p2 almacen/MRP"

Units: Unidades

(149) unidades a pedir p3=

"diferencia p3 almacen/MRP"

Units: Unidades

(150) unidades a pedir p4=

"diferencia p4 almacen/MRP"

Units: Unidades

(151) Unidades Almacenadas Listas Para Usar P1= INTEG (
tasa de almacenamiento p1-tasa de uso p1,
stock inicial p1)

Units: Unidades

(152) Unidades Almacenadas Listas Para Usar P2= INTEG (
tasa de almacenamiento p2-tasa de uso p2,
stock inicial p2)

Units: Unidades

(153) Unidades Almacenadas Listas Para Usar P3= INTEG (
tasa de almacenamiento p3-tasa de uso p3,
stock inicial p3)

Units: Unidades

(154) Unidades Almacenadas Listas Para Usar P4= INTEG (
tasa de almacenamiento p4-tasa de uso p4,
stock inicial p4)

Units: Unidades

(155) Unidades de P1 Preparadas Para Enviar= INTEG (
tasa de preparación de envío p1-tasa de envío p1,
0)

Units: Unidades [?,15]

- (156) Unidades de P2 Preparadas Para Enviar= INTEG (tasa de preparación de envío p2-tasa de envío p2, 0)
Units: Unidades [?,15]
- (157) Unidades de P3 Preparadas Para Enviar= INTEG (tasa de preparación de envío p3-tasa de envío p3, 0)
Units: Unidades [?,15]
- (158) Unidades de P4 Preparadas Para Enviar= INTEG (tasa de preparación de envío p4-tasa de envío p4, 0)
Units: Unidades [?,15]
- (159) Unidades En Proceso P1= INTEG (tasa de preparación p1-tasa de procesado p1, 0)
Units: Unidades
- (160) Unidades En Proceso P2= INTEG (tasa de preparación p2-tasa de procesado p2, 0)
Units: Unidades
- (161) Unidades En Proceso P3= INTEG (tasa de preparación p3-tasa de procesado p3, 0)
Units: Unidades
- (162) Unidades En Proceso P4= INTEG (tasa de preparación p4-tasa de procesado p4, 0)
Units: Unidades
- (163) Unidades Para Procesar P1= INTEG (tasa de pedio p1-tasa de preparación p1, 0)
Units: Unidades
- (164) Unidades Para Procesar P2= INTEG (tasa de pedio p2-tasa de preparación p2, 0)
Units: Unidades
- (165) Unidades Para Procesar P3= INTEG (tasa de pedio p3-tasa de preparación p3,

0)
Units: Unidades

(166) Unidades Para Procesar P4= INTEG (
tasa de pedido p4-tasa de preparación p4,
0)
Units: Unidades

(167) Unidades para revisar P1= INTEG (
tasa de recepción p1-tasa de almacenamiento p1,
0)
Units: Unidades

(168) Unidades para revisar P2= INTEG (
tasa de recepción p2-tasa de almacenamiento p2,
0)
Units: Unidades

(169) Unidades para revisar P3= INTEG (
tasa de recepción p3-tasa de almacenamiento p3,
0)
Units: Unidades

(170) Unidades para revisar P4= INTEG (
tasa de recepción p4-tasa de almacenamiento p4,
0)
Units: Unidades

(171) unidades pedidas p1=
unidades a pedir p1
Units: Unidades

(172) unidades pedidas p2=
unidades a pedir p2
Units: Unidades

(173) unidades pedidas p3=
unidades a pedir p3
Units: Unidades

(174) unidades pedidas p4=
unidades a pedir p4
Units: Unidades

